

2016/ITS/H/89 ✓

ANALISA STEADY STATE PADA MOTOR INDUKSI YANG DISUPLAI SUMBER TEGANGAN TIDAK SEIMBANG



RSE
621.462
Say
a-1
1988

OLEH :

NIKITA A. E. SAYANGBATI

NRP. 2852200315

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA**

ANALISA STEADY STATE PADA MOTOR INDUKSI YANG DISUPLAI SUMBER TEGANGAN TIDAK SEIMBANG

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan

Untuk Memperoleh Gelar

Sarjana Teknik Elektro

pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga

Jurusan Teknik Elektro

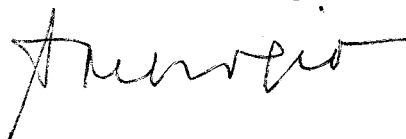
Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

S u r a b a y a

Mengetahui / Menyetujui

Dosen Pembimbing



(DR. Ir. SOEBAGIO)

S U R A B A Y A

OKTOBER 1988

ABSTRAK

Motor induksi tiga fasa idialnya memerlukan suplai tegangan tiga fasa yang simetris namun dalam prakteknya sering terjadi suplai dari sumber tegangan yang tidak seimbang, terjadinya ketidak seimbangan banyak dipengaruhi oleh beberapa hal misalnya karena sumber tegangannya yang tidak seimbang, atau terjadi satu kawat putus, atau mesinnya dalam hal ini banyak kemungkinan .

Akibat dari pengoperasian sumber tegangan yang tidak seimbang dapat menimbulkan panas yang melebihi kemampuan isolasi dan akhirnya merusak peralatan untuk itulah kita perlu menghitung batasan-batasan mana arus diijinkan bekerja dalam keadaan steady state begitu juga dengan torsi dan slipnya.

Untuk itulah dalam perhitungan nantinya digunakan reference frame koordinat sumbu D-Q-N.

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur hanya bagi TUHAN sebab DIA layak dipuji, oleh KASIH dan ANUGRAH NYA saja sehingga kami dapat menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini dengan baik.

Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana di Jurusan Teknik elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, yang mempunyai bobot kredit 7 sks dari 160 beban sks yang harus diselesaikan oleh seorang mahasiswa.

Judul tugas akhir yang kami tulis ini adalah

"ANALISA STEADY STATE PADA MOTOR INDUKSI YANG DISUPLAI TEGANGAN SUMBER TIDAK SEIMBANG"

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini kami telah berusaha dengan sekuat kemampuan untuk menghadapi segala hambatan dan rintangan. Namun demikian kami menyadari bahwa dalam menyusun tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu segala kritik dan saran untuk perbaikannya akan kami terima dengan senang hati.

Akhirnya harapan kami semoga buku tugas akhir ini ada guna serta manfaatnya bagi pembaca yang memerlukan untuk tujuan baik serta kemajuan umat manusia.

Surabaya, Oktober 1988

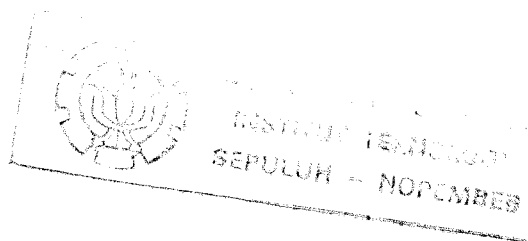
Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya penyusunan buku tugas ahkir ini perkenankan pada kesempatan ini kami mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dr. Ir. Soebagio selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan dan pengarahan hingga terselesainya tugas ahkir ini
2. Dr. Ir. Ontoseno P. selaku dosen wali yang telah memberi bimbingan dan dorongan moril yang besar artinya bagi kami.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan hikmat dan rahmatNya.



DAFTAR ISI

	HALAMAN
JUDUL	1
PENGESAHAN	11
ABSTRAK	111
KATA PENGHANTAR	1v
UCAPAN TERIMA KASIH	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
BAB II MODEL D-Q MESIN INDUKSI	4
1. PERNYATAAN VEKTOR DALAM SISTEM KOORDINAT	4
2. DISKRIPSI VEKTOR PADA RANGKAIAN STATIONER	6
3. UNIT VEKTOR DALAM DEFINISI SISTEM KOORDINAT BERPUTAR	8
4. PERSAMAAN TRANSFORMASI	11
5. PERUBAHAN SKALA	23
6. PERSAMAAN RANGKAIAN DALAM SISTEM KOORDINAT D-Q-N	14
7. ALIRAN DAYA DALAM RANGKAIAN EKIVALEN D-Q-N	15
8. RANGKAIAN EKIVALEN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA	17
9. PERSAMAAN MOTOR INDUKSI PADA REFERENSI FRAME D-Q-N	23
10. PERSAMAAN KONVERSI ENERGI	24
11. BENTUK MATRIKS UNTUK PERSAMAAN D-Q MOTOR INDUKSI	25

BAB III	OPERASI TAK SEIMBANG PADA MESIN INDUKSI	
	SIMETRIS.....	29
	1. ANALISA OPERASI STEADY STATE PADA KONDISI	
	TEGANGAN TIDAK SEIMBANG	29
	2. METODE MULTIPLE REFERENSI FRAME	40
BAB IV	SIMULASI KOMPUTER MESIN INDUKSI.....	45
	1. SIMULASI MESIN INDUKSI SIMETRIS DALAM	
	REFERENSI FRAME TERTENTU	45
	2. SIMULASI MODE PENGOPERASIAN DARI MESIN	
	INDUKSI PADA KONDISI SUMBER TEGANGAN	
	TIDAK SEIMBANG	50
	3. KONDISI MOTOR INDUKSI PADA SUMBER TEGANGAN	
	TIDAK SEIMBANG	51
	4. PERHITUNGAN STEADY STATE PADA MOTOR INDUKSI	
	TIGA PHASA TEGANGAN TIDAK SEIMBANG	54
BAB V	KESIMPULAN	59
	DAFTAR PUSTAKA.....	61
	USULAN TUGAS AKHIR.....	62
	LAMPIRAN I.....	62
	LAMPIRAN II.....	65
	LAMPIRAN III.....	72
	LAMPIRAN IV.....	74

FAFTAR GAMBAR

GAMBAR	HALAMAN
2.1 Sistem koordinat Cartesian tetap dan berputar	5
2.2 Tiga rangkaian r-l yang sama	7
2.3 Peninjauan tiga rangkaian dalam sistem koordinat tiga dimensi	8
2.4 Rangkaian ekivalen dalam arbitrary reference frame	16
2.5 Sumbu stator dan rotor motor induksi	18
2.6 Sumbu-sumbu belitan dilihat dari sumbu-n	18
2.7 Rangkaian motor induksi dalam sistem koordinat d-q-n	21
2.8 Rangkaian motor induksi tiga fasa dengan rotor yang berputar terhadap stator	23
4.1 Simulasi motor induksi tiga fasa dalam referensi frame bebas	49
4.2 Performansi motor induksi 10 HP pada sumber tegangan tidak seimbang	55
4.3 Karakteristik kecepatan-torsi steady state untuk kondisi tidak seimbang	56

BAB I

PENDAHULUAN

Untuk mendapatkan performance yang lebih baik dari motor induksi tiga fasa yang seimbang diperlukan suplai tegangan tiga fasa yang simetris. Dalam prakteknya sering dijumpai ketidak simetrisan, baik yang terjadi pada tegangan suplai atau pada mesin tersebut.

Dalam tugas akhir ini akan diteliti performance motor induksi bila disuplai sumber tegangan tidak seimbang, dalam hal ini sampai sejauh mana besaran-besaran arus dan tegangan bisa ditolerir yang disebabkan oleh kondisi sumber tersebut.

Dalam menyelesaikan permasalahan analisa steady state motor induksi yang disuplai tegangan tidak seimbang maka dipakai teori referensi frame sumbu koordinat D-Q-N.

Pada BAB II penurunan teori referensi frame sumbu koordinat D-Q-N motor induksi dibahas secara umum, Kemudian pada BAB III sebelum masuk pada penurunan yang sebenarnya dalam teori referensi frame koordinat D-Q-N diberikan gambaran hubungannya dengan teori komponen simetri untuk keadaan tidak seimbang yang selama ini telah umum dipakai dalam menyelesaikan persoalan tidak seimbang, khususnya dalam analisa steady state dan selanjutnya perhitungan untuk keadaan tersebut tentu saja kita tidak membahas dengan perhitungan komponen simetri karena dalam bab IV terlihat contoh suatu keadaan sumber tidak seimbang yang diselesaikan dengan sumbu D-Q-N.

Simulasi penyelesaian dengan menggunakan komputer serta hasil perhitungan komputer diperlihatkan dalam bab IV, dimana relevansinya dapat dikembangkan model simulasi untuk keperluan analisa, baik untuk keadaan seimbang maupun tidak seimbang dengan menggunakan komputer.

Akhirnya kesimpulan dalam tugas akhir ini diberikan dalam BAB V yang merupakan performance antara slip - torsi dan Kecepatan - torsi.

Dan sebagai tambahan diberikan beberapa lampiran hasil-hasil perhitungan untuk sumber tegangan tidak seimbang, salah satu jepitan sumber tegangan terbuka dan

sebagai pembanding yaitu keadaan seimbang yang mempunyai toleransi ± 0.2

BAB II

MODEL D-Q MESIN INDUKSI

II. 1. PERNYATAAN VEKTOR DALAM SISTEM KOORDINAT

Suatu vektor yang bertempat kedudukan pada titik P dalam suatu sistem koordinat inersia (tidak bergerak) dengan sumbu-sumbu x, y, z dapat dinyatakan sebagai :

$$\vec{r}^s = x^s \vec{u}_x^s + y^s \vec{u}_y^s + z^s \vec{u}_z^s \quad (2.1)$$

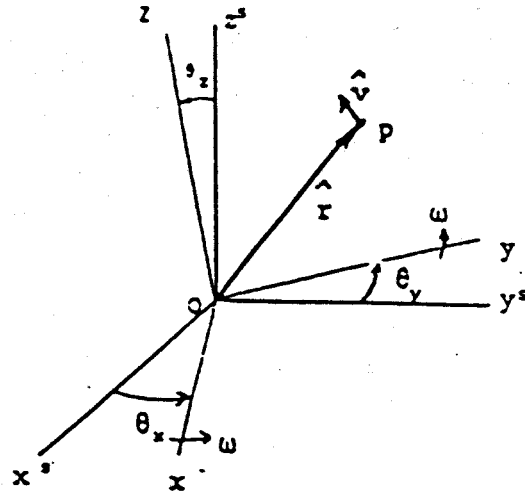
dimana \vec{u}_x^s , \vec{u}_y^s , \vec{u}_z^s adalah vektor satuan dalam arah x, y, z. Kecepatan dari titik P adalah

$$\frac{d\vec{r}^s}{dt} = \frac{dx^s}{dt} \vec{u}_x^s + \frac{dy^s}{dt} \vec{u}_y^s + \frac{dz^s}{dt} \vec{u}_z^s \quad (2.2)$$

Superskrip "s" digunakan untuk menunjukkan bahwa referensi framenya adalah stasioner. Dan \vec{u}_x^s , \vec{u}_y^s , dan \vec{u}_z^s adalah unit vektor pada arah x, y, z.

Sekarang dimisalkan sistem koordinat yang lain berputar terhadap sistem pertama seperti ditunjukkan pada gambar 2.1. Pada sistem berputar vektor \vec{r} dinyatakan oleh:

$$\vec{r} = x \vec{u}_x + y \vec{u}_y + z \vec{u}_z \quad (2.3)$$



1)
GAMBAR 2.1

SISTEM KOORDINAT KARTESIAN TETAP DAN BERPUTAR

Kecepatan vektor \hat{r} dalam koordinat frame yang berputar adalah

$$\frac{d\hat{r}^s}{dt} = \frac{dx}{dt} \hat{u}_x + \frac{dy}{dt} \hat{u}_y + \frac{dz}{dt} \hat{u}_z + x \frac{d\hat{u}_x}{dt} + y \frac{d\hat{u}_y}{dt} + z \frac{d\hat{u}_z}{dt} \quad (2.4)$$

Dalam aljabar selanjutnya persamaan ini disederhanakan menjadi :

1) Extension, "Dynamic and Control AC Drive", Course Outline at University of Wisconsin, 1983, p. 7-1.

$$\frac{d\hat{r}^s}{dt} = \frac{d\hat{r}}{dt} + \hat{\omega} \times \hat{r} \quad (2.5)$$

Besaran dr/dt tanpa subskrip adalah kecepatan dari titik yang dilihat dalam sistem berputar. Dan $\hat{\omega}$ adalah kecepatan sudut dari sistem berputar dan mempunyai arah normal terhadap bidang putaran. Besaran $\hat{\omega} \times \hat{r}$ adalah kecepatan vektor \hat{r} yang disebabkan oleh putaran frame referensi. Untuk membedakan diantara kecepatan-kecepatan dalam dua sistem koordinat, dipakai superskrip "s" untuk mengartikan bahwa vektor dinyatakan dalam frame yang stasioner.

II. 2. DISKRIPSI VEKTOR PADA RANGKAIAN STASIONER

Misalkan ada 3 rangkaian r-L yang sama seperti ditunjukkan pada gambar 2.2.

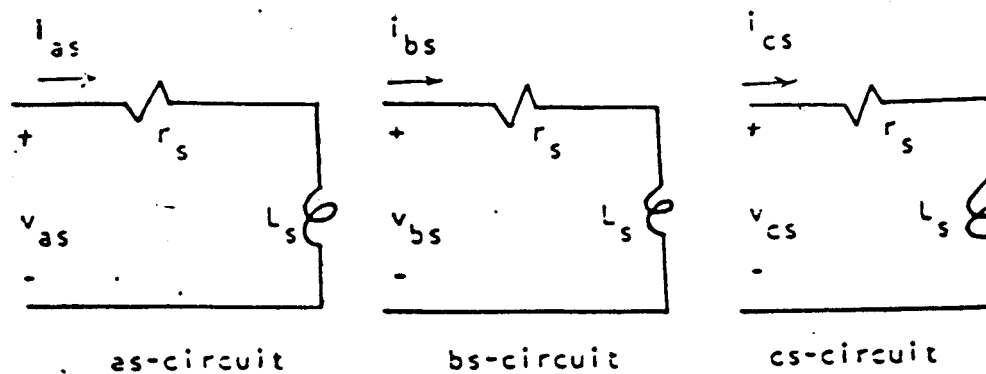
Persamaan rangkaiannya adalah sebagai berikut :

$$v_{as} = i_{as}r_s + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \quad (2.6)$$

$$v_{bs} = i_{bs}r_s + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \quad (2.7)$$

$$v_{cs} = i_{cs}r_s + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \quad (2.8)$$

dimana $\lambda_{as} = L_s i_{as}$, $\lambda_{bs} = L_s i_{bs}$ dan $\lambda_{cs} = L_s i_{cs}$.



GAMBAR 2.2.

TIGA RANGKAIAN R - L YANG SAMA

Misal kita hendak meninjau sistem koordinat tiga dimensi dengan sumbu-sumbu as, bs, dan cs. Kemudian kita tempatkan rangkaian dari gambar 2.2 pada sistem koordinat seperti ditunjukkan oleh gambar 2.3. Tegangan, arus, dan flux linkage sesaat pada rangkaian as diasumsikan mempunyai hubungan sepanjang sumbu as. Interpretasi yang sama digunakan untuk rangkaian bs dan cs.

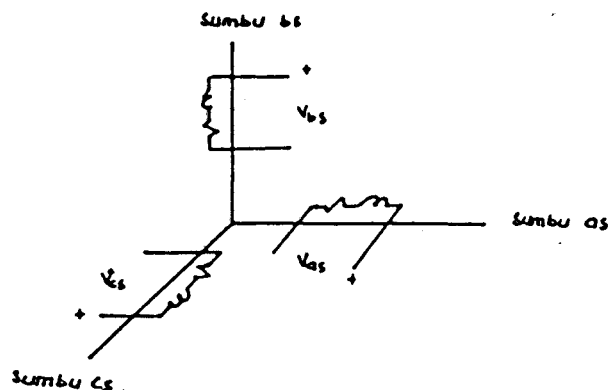
Tegangan, arus, dan flux linkage dari ketiga rangkaian sekarang dapat dinyatakan sebagai kesatuan vektor yaitu :

$$\hat{v}_s^s = v_{as} \hat{u}_{as} + v_{bs} \hat{u}_{bs} + v_{cs} \hat{u}_{cs} \quad (2.9)$$

$$\hat{i}_s^s = i_{as} \hat{u}_{as} + i_{bs} \hat{u}_{bs} + i_{cs} \hat{u}_{cs} \quad (2.10)$$

$$\hat{\lambda}_s^s = \lambda_{as} \hat{u}_{as} + \lambda_{bs} \hat{u}_{bs} + \lambda_{cs} \hat{u}_{cs} \quad (2.11)$$

Sama seperti sebelumnya, subskrip "s" menunjukkan rangkaian adalah stasioner.



2)
GAMBAR 2.3

PENINJAUAN TIGA RANGKAIAN DALAM SISTEM KOORDINAT TIGA DIMENSI

Ketiga persamaan rangkaian tersebut dapat juga dinyatakan dalam bentuk vektor. Dan dalam sistem koordinat yang tidak berputar persamaan vektor untuk tegangan adalah:

$$\hat{v}_s = r_s \hat{i}_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \quad (2.12)$$

II. 3. UNIT VEKTOR DALAM DEFINISI SISTEM KOORDINAT BERPUTAR

Misalkan lokasi dua unit vektor terletak pada bidang dan vektor ketiga normal pada bidang. Sebagai penolong

2) Ibid, p. 7-3

dalam bidang ini diambil asumsi hal khusus dimana sumber tegangan adalah sinusoidal yang seimbang. Dalam hal ini vektor tegangan adalah

$$\hat{v}_s = V_s [\cos \omega_e t \hat{u}_{as} + \cos(\omega_e t - 2\pi/3) \hat{u}_{bs} + \cos(\omega_e t + 2\pi/3) \hat{u}_{cs}] \quad (2.13)$$

Dua vektor pada bidang adalah \hat{v}_s dan \hat{dv}_s/dt dan unit vektor dalam bidang tersebut adalah :³⁾

$$\frac{\hat{v}_s}{|\hat{v}_s|} = \frac{\hat{v}_s}{\sqrt{3/2} V_s} = \hat{u}_q \quad (2.14)$$

atau

$$\hat{u}_q = \sqrt{2/3} [\cos \theta \hat{u}_{as} + \cos(\theta - 2\pi/3) \hat{u}_{bs} + \cos(\theta + 2\pi/3) \hat{u}_{cs}] \quad (2.15)$$

dimana $\theta = \omega_e t$.

Sedang yang lainnya adalah

$$\frac{\frac{-d\hat{v}_s}{dt}}{\left| \frac{d\hat{v}_s}{dt} \right|} = \frac{\omega_e V_s}{\sqrt{3/2} \omega_e V_s} [\sin \theta \hat{u}_{as} + \sin(\theta - 2\pi/3) \hat{u}_{bs} + \sin(\theta + 2\pi/3) \hat{u}_{cs}] \quad (2.16)$$

³⁾ Ibid, p. 7-4

atau

$$\hat{u}_d = \sqrt{2/3} [\sin \theta \hat{u}_{as} + \sin(\theta - 2\pi/3) \hat{u}_{bs} + \sin(\theta + 2\pi/3) \hat{u}_{cs}] \quad (2.17)$$

Suatu vektor yang normal terhadap bidang didefinisikan sebagai :

$$\hat{n} \cdot \hat{v}_s = 0 \quad (2.18)$$

dimana

$$\hat{n} = \hat{u}_{as} + \hat{u}_{bs} + \hat{u}_{cs} \quad (2.19)$$

Unit vektor dalam arah \hat{n} (atau $\hat{\omega}$) didefinisikan sebagai :

$$\hat{u}_n = \frac{\hat{n}}{|\hat{n}|} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\hat{u}_{as} + \hat{u}_{bs} + \hat{u}_{cs}) \quad (2.20)$$

Penulisan kembali dua unit vektor dalam bidang rotasi dan unit vektor yang normal terhadap bidang adalah :

$$\hat{u}_q = \sqrt{2/3} [\cos \theta \hat{u}_{as} + \cos(\theta - 2\pi/3) \hat{u}_{bs} + \cos(\theta + 2\pi/3) \hat{u}_{cs}] \quad (2.21)$$

$$\hat{u}_d = \sqrt{2/3} [\sin \theta \hat{u}_{as} + \sin(\theta - 2\pi/3) \hat{u}_{bs} + \sin(\theta + 2\pi/3) \hat{u}_{cs}] \quad (2.22)$$

$$\hat{u}_n = \sqrt{1/3} [\hat{u}_{as} + \hat{u}_{bs} + \hat{u}_{cs}] \quad (2.23)$$

dimana

$$\theta = \int_0^t \omega(t) dt$$

Hubungan kebalikannya adalah

$$\hat{u}_{as} = \sqrt{2/3} [\cos \theta \hat{u}_q + \sin \theta \hat{u}_d + 1/\sqrt{2} \hat{u}_n] \quad (2.24)$$

$$\hat{u}_{bs} = \sqrt{2/3} [\cos(\theta - 2\pi/3) \hat{u}_q + \sin(\theta - 2\pi/3) \hat{u}_d + 1/\sqrt{2} \hat{u}_n] \quad (2.25)$$

$$\hat{u}_{cs} = \sqrt{2/3} [\cos(\theta + 2\pi/3) \hat{u}_q + \sin(\theta + 2\pi/3) \hat{u}_d + 1/\sqrt{2} \hat{u}_n] \quad (2.26)$$

II. 4. PERSAMAAN TRANSFORMASI

Dalam frame yang stasioner

$$\hat{v}_s^s = v_{as} \hat{u}_{as} + v_{bs} \hat{u}_{bs} + v_{cs} \hat{u}_{cs} \quad (2.27)$$

Bila v_{qs} , v_{ds} , dan v_{ns} berarti komponen dalam arah u_q , u_d , dan u_n pada sistem koordinat berputar, maka :

$$\hat{v}_s = v_{qs} \hat{u}_q + v_{ds} \hat{u}_d + v_{ns} \hat{u}_n \quad (2.28)$$

Vektor \hat{v}_s^s dan \hat{v}_s adalah sejenis dan mempunyai harga yang sama, sehingga :

$$\hat{v}_s^s = \hat{v}_s \quad (2.29)$$

Substitusi persamaan (2.21), (2.22), dan (2.23) kedalam persamaan (2.28) kemudian koefisien-koefisien dari persamaan itu kita gunakan sebagai persamaan transformasi antara komponen-komponen a_s , b_s , c_s dan q , d , n , sehingga :⁴⁾

$$v_{qs} = \sqrt{2/3} [v_{as} \cos\theta + v_{bs} \cos(\theta - 2\pi/3) + v_{cs} \cos(\theta + 2\pi/3)] \quad (2.30)$$

$$v_{ds} = \sqrt{2/3} [v_{as} \sin\theta + v_{bs} \sin(\theta - 2\pi/3) + v_{cs} \sin(\theta + 2\pi/3)] \quad (2.31)$$

$$v_{ns} = \sqrt{1/3} [v_{as} + v_{bs} + v_{cs}] \quad (2.32)$$

Dengan cara yang sama persamaan transformasi tersebut berlaku untuk arus dan flux linkage.

Harga v_{qs} , v_{ds} dan v_{ns} adalah dalam bentuk komponen "sumbu quadrature", "sumbu direct", dan "sumbu netral" dari tegangan. Bentuk quadrature dan direct diperoleh dari pertimbangan dalam analisa mesin. Bentuk netral timbul karena komponen ini mengakibatkan adanya aliran arus dalam lintasan netral dari suatu jaringan tiga phasa.

⁴⁾ Ibid, p. 7-8.

11. 5. PERUBAHAN SKALA

Kita telah melihat bahwa jika tegangan adalah sinusoidal yang seimbang dengan amplitudo V_s , magnitudo vektor \hat{v}_s adalah

$$|\hat{v}_s| = \sqrt{3/2} V_s \quad (2.33)$$

Karenanya, v_s memotong lingkaran dalam bidang d-q dengan "radius" ini. Tetapi jika tegangan seimbang akan tepat sekali untuk membatasi lingkaran dengan radius V_s mendekati $\sqrt{3/2} V_s$. Ini dapat dilakukan dengan mengubah skala dengan faktor perkalian $\sqrt{2/3}$ dari variabel q, d, n. Karena itu,

$$\hat{v}'_s = \sqrt{2/3} \hat{v}_s \quad (2.34)$$

atau

$$v'_{qs} = \sqrt{2/3} v_{qs} \quad (2.35)$$

$$v'_{ds} = \sqrt{2/3} v_{ds} \quad (2.36)$$

$$v'_{ns} = \sqrt{2/3} v_{ns} \quad (2.37)$$

Hal yang terpenting dalam praktek adalah menurunkan bentuk umum dari persamaan transformasi tersebut dengan mempertimbangkan perubahan skala. Akhirnya persamaan transformasi menjadi :

$$v_{qs} = 2/3[v_{as} \cos\theta + v_{bs} \cos(\theta - 2\pi/3) + v_{cs} \cos(\theta + 2\pi/3)] \quad (2.38)$$

$$v_{ds} = 2/3[v_{as} \sin\theta + v_{bs} \sin(\theta - 2\pi/3) + v_{cs} \sin(\theta + 2\pi/3)] \quad (2.39)$$

$$v_{ns} = \sqrt{2/3} [v_{as} + v_{bs} + v_{cs}] \quad (2.40)$$

Hubungan kebalikannya adalah :

$$v_{as} = v_{qs} \cos \theta + v_{ds} \sin \theta + v_{ns}/\sqrt{2} \quad (2.41)$$

$$v_{bs} = v_{qs} \cos(\theta - 2\pi/3) + v_{ds} \sin(\theta - 2\pi/3) + v_{ns}/\sqrt{2} \quad (2.42)$$

$$v_{cs} = v_{qs} \cos(\theta + 2\pi/3) + v_{ds} \sin(\theta + 2\pi/3) + v_{ns}/\sqrt{2} \quad (2.43)$$

II. 6. PERSAMAAN RANGKAIAN DALAM SISTEM KOORDINAT D-Q-N

Persamaan vektor untuk rangkaian dalam frame berputar adalah :

$$\hat{v}_s = r_s \hat{i}_s + \frac{d\hat{\lambda}_s}{dt} + \hat{\omega} \times \hat{\lambda}_s \quad (2.44)$$

dimana ω sekarang adalah normal pada bidang putaran, dan dinyatakan sebagai :

$$\hat{\omega} = \omega \hat{u}_n \quad (2.45)$$

Dengan menggunakan sifat perkalian silang (cross product) secara eksplisit dan memasukannya pada masing-masing komponen didapat :

$$v_{qs} = r_s i_s + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega \lambda_{ds} \quad (2.46)$$

$$v_{ds} = r_s i_s + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega \lambda_{qs} \quad (2.47)$$

$$v_{ns} = r_s i_s + \frac{d\lambda_{ns}}{dt} \quad (2.48)$$

Dengan demikian rangkaian ekivalen yang diturunkan berdasarkan persamaan rangkaian gambar 2.3 yang telah ditransformasikan kedalam koordinat sumbu d-q dapat ditunjukkan dalam gambar 2.4 dimana hubungan persamaannya dalam variabel d-q-n seperti terlihat pada persamaan (2.46) sampai dengan (2.48). Karena ω adalah tertentu dan dapat dipilih secara bebas maka sistem koordinat ini disebut frame referensi yang tertentu (arbitrary reference frame).

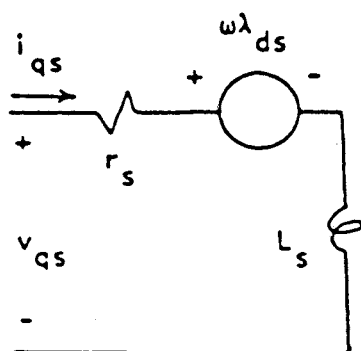
II. 7. ALIRAN DAYA DALAM RANGKAIAN EKIVALEN D-Q-N

Daya sesaat dalam rangkaian as-, bs-, cs- didefinisikan sebagai

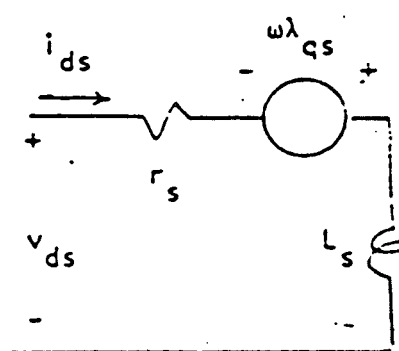
$$P_{abcs} = v_{as} i_{as} + v_{bs} i_{bs} + v_{cs} i_{cs} \quad (2.49)$$

Dalam bentuk vektor ekivalen daya dinyatakan sebagai:

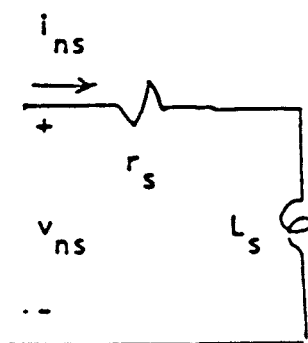
$$P_{abcs} = \hat{v}_{abcs} \cdot \hat{i}_{abcs} \quad (2.50)$$



qs-circuit



ds-circuit



ns-circuit

5)
GAMBAR 2.4

RANGKAIAN EKIVALEN DALAM REFERENCE FRAME BEBAS

5) Ibid, p. 7-11

Pernyataan vektor tegangan dan arus dalam variabel ds-, qs-ns- adalah

$$P_{abcs} = \sqrt{3/2} \hat{v}_{qdns} \cdot \sqrt{3/2} \hat{i}_{qdns} \quad (2.51)$$

$$= 3/2 (v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds} + v_{ns} i_{ns}) \quad (2.52)$$

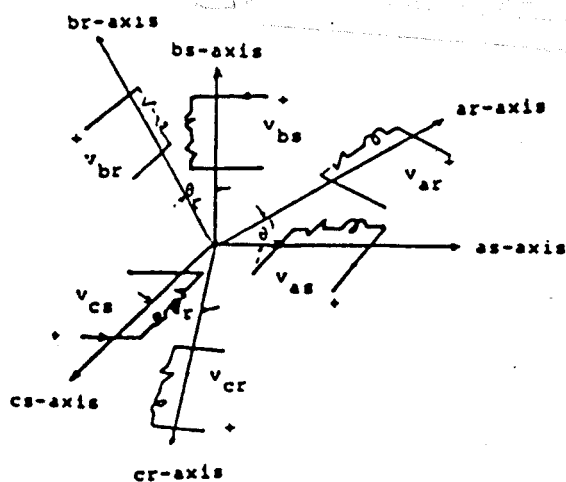
$$= 3/2 P_{qdns} \quad (2.53)$$

Karena itu daya dalam rangkaian ekuivalen qs-, ds-, ns- harus dikalikan dengan 3/2 agar didapatkan aliran daya seperti pada rangkaian as-, bs-, cs- yang nyata.

II. 8. RANGKAIAN EKIVALEN MOTOR INDUKSI TIGA PHASA

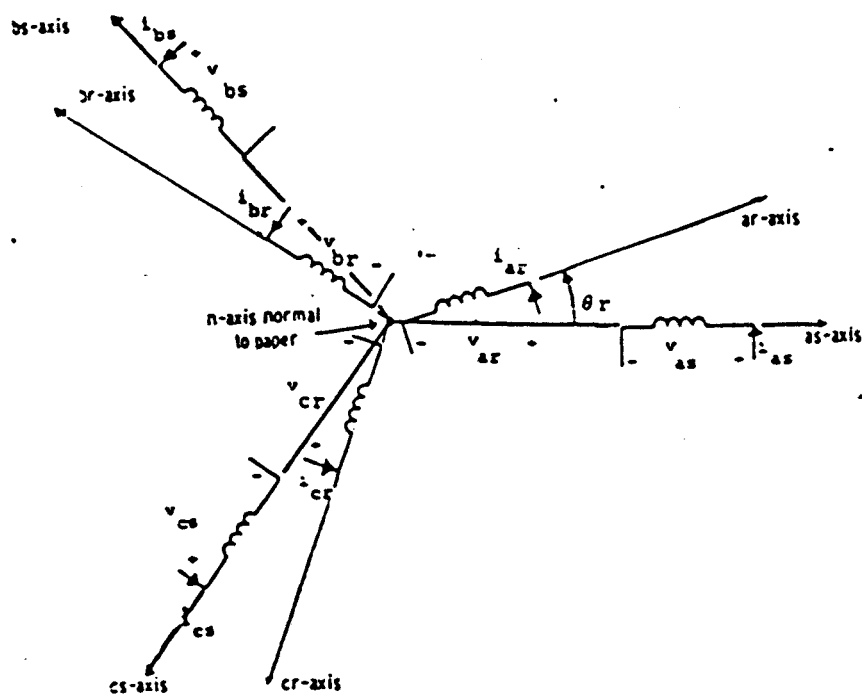
Pada bagian ini akan ditinjau rangkaian tiga phasa yang berputar (mesin induksi simetris). untuk itu akan diperhatikan rangkaian rangkaian ekuivalen seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5. Rangkaian stator ditunjukkan sepanjang sumbu as, bs, dan cs dengan cara yang sama seperti sebelumnya. Rangkaian rotor ditempatkan sepanjang sumbu ar, br, dan cr yang dapat berputar relatif terhadap rangkaian stator. Maka tegangan, arus dan flux linkage diasumsikan mempunyai hubungan jarak sepanjang sumbu ini.

Orientasi relatif terhadap belitan-belitan lebih baik dipandang sebagai orientasi tunggal sehingga sumbu-n akan tegak lurus pada bidang baca. Gambar 2.6 menunjukkan hasil peninjauan tersebut.



GAMBAR 2.5

SUMBU STATOR DAN ROTOR MOTOR INDUKSI



GAMBAR 2.6

SUMBU-SUMBU BELITAN DILIHAT DARI SUMBU - N

Pendekatan analisa daripada persamaan sistem mempunyai bentuk sebagai :

$$\bar{v}_s = r_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\lambda}_s}{dt} \quad (2.54)$$

$$\bar{v}_r = r_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\lambda}_r}{dt} \quad (2.55)$$

dimana

$$\bar{\lambda}_s = \bar{L}_s \bar{i}_s + \bar{L}_{sr} \bar{i}_r$$

$$\bar{\lambda}_r = \bar{L}_{sr} \bar{i}_s + \bar{L}_r \bar{i}_r$$

Matrik \bar{L}_s , \bar{L}_r dan \bar{L}_{sr} mempunyai bentuk yang sama seperti pada transformator tiga fasa yaitu : ⁶⁾

$$\bar{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_{ls} + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

$$\bar{L}_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & L_{lr} + L_{mr} & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix}$$

$$\bar{L}_{sr} = \begin{bmatrix} L_{sr} & -L_{sr}/2 & -L_{sr}/2 \\ -L_{sr}/2 & L_{sr} & -L_{sr}/2 \\ -L_{sr} & -L_{sr} & L_{sr} \end{bmatrix}$$

6) T.A. Lipo, "Electric Drive", class note, University of Wisconsin, 1984.

Dengan menggunakan persamaan transformasi kita rubah bentuk persamaan tersebut kedalam variabel d-q, sehingga didapatkan bentuk persamaan sebagai :

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + (L_{1s} + 3/2 L_{ms}) \frac{di_{qs}}{dt} + 3/2 L_{sr} \frac{di_{qr}}{dt} + \omega [(L_{1s} + 3/2 L_{ms}) i_{ds} + 3/2 L_{sr} i_{dr}] \quad (2.56)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + (L_{1s} + 3/2 L_{ms}) \frac{di_{ds}}{dt} + 3/2 L_{sr} \frac{di_{dr}}{dt} + \omega [(L_{1s} + 3/2 L_{ms}) i_{qs} + 3/2 L_{sr} i_{qr}] \quad (2.57)$$

$$v_{ns} = r_s i_{ns} + L_{1s} \frac{di_{ns}}{dt} \quad (2.58)$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + (L_{1r} + 3/2 L_{mr}) \frac{di_{qr}}{dt} + 3/2 L_{sr} \frac{di_{qs}}{dt} + (\omega - \omega_r) [(L_{1r} + 3/2 L_{mr}) i_{dr} + 3/2 L_{sr} i_{ds}] \quad (2.59)$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} + (L_{1r} + 3/2 L_{mr}) \frac{di_{dr}}{dt} + 3/2 L_{sr} \frac{di_{ds}}{dt} + (\omega - \omega_r) [(L_{1r} + 3/2 L_{mr}) i_{qr} + 3/2 L_{sr} i_{qs}] \quad (2.60)$$

$$v_{nr} = r_r i_{nr} + L_{1r} \frac{di_{nr}}{dt} \quad (2.61)$$

Rangkaian ekivalen yang diturunkan berdasarkan persamaan tersebut ditunjukkan pada gambar 2.7 dimana telah didefinisikan untuk keempat flux linkage pada sumbu d-q sebagai

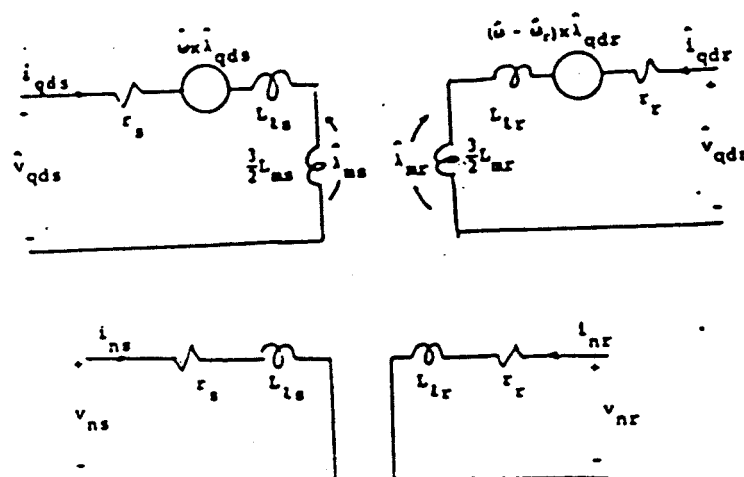
$$\lambda_{ds} = (L_{ls} + 3/2 L_{ms}) i_{ds} + 3/2 L_{sr} i_{dr} \quad (2.62)$$

$$\lambda_{qs} = (L_{ls} + 3/2 L_{ms}) i_{qs} + 3/2 L_{sr} i_{qr} \quad (2.63)$$

$$\lambda_{dr} = (L_{lr} + 3/2 L_{mr}) i_{dr} + 3/2 L_{sr} i_{ds} \quad (2.64)$$

$$\lambda_{qr} = (L_{lr} + 3/2 L_{mr}) i_{qr} + 3/2 L_{sr} i_{qs} \quad (2.65)$$

Karena bagian stator pada mesin adalah diam, rangkaian ekivalen stator akan identik dengan primer trafo tiga phasa. Bagian ini pada rangkaian ekivalen ditunjukkan pada sisi sebelah kiri pada gambar 2.7. Jika rotor tidak berputar maka rangkaian ekivalennya juga akan sama seperti sekunder trafo tiga phasa. Tetapi rangkaian rotor ini umumnya



7)
GAMBAR 2.7

RANGKAIAN MOTOR INDUKSI DALAM SISTEM KOORDINAT D-Q-H

7) Extension, op. cit., p. 7-23

berputar pada kecepatan sudut $d\theta_r/dt = \omega_r$, sehingga besaran-besaran vektor rotor berputar pada kecepatan $\omega - \omega_r$ relatif terhadap putaran frame d-q. Kecepatan tegangan yang terjadi dalam rangkaian ekivalen sebanding dengan kecepatan relatif dari putaran. Bagian sisi sebelah kanan pada gambar 2.7 menunjukkan rangkaian ekivalen rotor tersebut.

Bila rasio transformasi belitan dijadikan untuk menyederhanakan sistem kedalam rangkaian ekivalen T, hasil rangkaian ekivalennya ditunjukkan pada gambar 2.8 dimana dalam gambar ini rangkaianannya dinyatakan dalam ketiga sumbu.

II. 9. PERSAMAAN MOTOR INDUKSI PADA REFERENSI FRAME D-Q-N

Rangkaian T ekivalen d-q-n pada gambar 2.8 dihubungkan menurut persamaan-persamaan seperti dibawah. Persamaan-persamaan ini dapat menggambarkan kelakuan steady state motor induksi dalam referensi frame d-q-n. Persamaan-persamaan tersebut adalah :

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega \lambda_{ds} \quad (2.66)$$

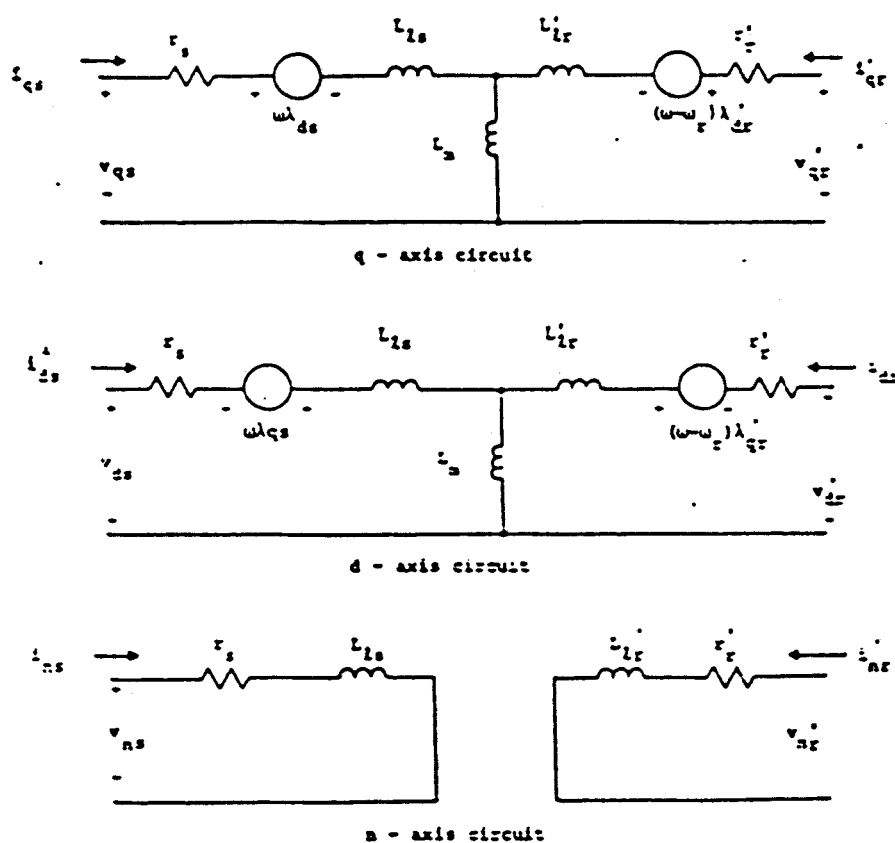
$$v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega \lambda_{qs} \quad (2.67)$$

$$v_{ns} = r_s i_{ns} + \frac{d\lambda_{ns}}{dt} \quad (2.68)$$

$$v_{qr'} = r_{r'} i_{qr'} + \frac{d\lambda_{qr'}}{dt} + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr'} \quad (2.69)$$

$$v_{dr'} = r_{r'} i_{dr'} + \frac{d\lambda_{dr'}}{dt} + (\omega - \omega_r) \lambda_{qr'} \quad (2.70)$$

$$v_{nr'} = r_{r'} i_{nr'} + \frac{d\lambda_{nr'}}{dt} \quad (2.71)$$



8)

GANBAR 2.8

RANGKAIAN MOTOR INDUKSI TIGA PHASE
DENGAN ROTOR YANG BERPUTAR TERHADAP STATOR

8) Extension, op.cit., p.7-25

sedang persamaan untuk flux linkagenya adalah :

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr'}) \quad (2.72)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr'}) \quad (2.73)$$

$$\lambda_{ns} = L_{ls} i_{ns} \quad (2.74)$$

$$\lambda_{qr'} = L_{lr'} i_{qr'} + L_m (i_{qs} + i_{qr'}) \quad (2.75)$$

$$\lambda_{dr'} = L_{lr'} i_{dr'} + L_m (i_{ds} + i_{dr'}) \quad (2.76)$$

$$\lambda_{nr'} = L_{ln'} i_{nr'} \quad (2.77)$$

11.10. PERSAMAAN KONVERSI ENERGI

Pada mesin induksi energi listrik diubah menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini terjadi karena adanya interaksi antara arus yang mengalir pada stator dengan flux celah udara yang menghasilkan torsi dan bilamana torsi ini mampu melawan torsi beban maka rotor akan berputar. Secara fisik torsi elektromagnetik dihasilkan dari perkalian silang (cross product) antara MMF stator dengan flux celah udara. Dan dalam kebanyakan rangkaian ekuivalen torsi ini diartikan sebagai perkalian silang antara arus stator (MMF) dengan mutual flux linkage (flux celah udara).

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \hat{\lambda}_m \times \hat{i}_{qds} \quad (2.78)$$

Perkalian dengan $P/2$ yang timbul disebabkan karena vektor arus dan flux terdapat pada semua pasangan kutup mesin. Sedangkan perkalian dengan $3/2$ disebabkan karena adanya perubahan dalam faktor skala.

II.11. BENTUK MATRIK UNTUK PERSAMAAN D-Q MOTOR INDUKSI

Pada bagian ini semua persamaan motor induksi yang telah diturunkan akan diperlihatkan secara lengkap dalam bentuk matrik. Dari bentuk ini kita akan mulai menerapkan persamaan-persamaan ini untuk menyelesaikan berbagai macam problem. Karena telah kita ketahui bahwa arus sumbu netral tidak menghasilkan torsi maka kita akan selalu berurusan dengan sistem dengan tiga kawat. Tujuannya adalah untuk menghilangkan komponen urutan netral dari perhatian kita.

Sebagai catatan juga bahwa hingga pada bagian ini kita tetap memakai flux linkage dan arus-arus mesin secara bersama-sama sebagai variabel-variabel mesin. Karena keduanya dihubungkan secara aljabar maka jelas kelihatan bahwa satu atau lainnya dapat dieliminasi dari persamaan tegangan d-q. Dalam permasalahan-permasalahan selanjutnya lazimnya dimisalkan arus-arus sebagai variabel (state) tak bebas dan flux-flux sederhana sebagai variabel yang dapat dihitung dari arus-arus. Jika ini kita kerjakan dengan eliminasi urutan netral dari pemisalan, persamaan-persamaan

mesin dalam bentuk matrik menjadi :⁹⁾

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr'} \\ v_{dr'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + L_s p & \omega L_s & L_m p & \omega L_m \\ -\omega L_s & r_s + L_s p & -\omega L_m & L_m p \\ L_m p & (\omega - \omega_r) L_m & r_{r'} + L_{r'} p & (\omega - \omega_r) L_{r'} \\ -(\omega - \omega_r) L_m & L_m p & -(\omega - \omega_r) L_{r'} & r_{r'} + L_{r'} p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr'} \\ i_{dr'} \end{bmatrix} \quad (2.79)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{qs} i_{dr'} - i_{ds} i_{qr'}) \quad (2.80)$$

dimana :

$$L_s = L_{ls} + L_m$$

$$L_{r'} = L_{lr'} + L_m$$

Bentuk alternatip dari persamaan-persamaan mesin dalam bentuk matrik diberikan seperti dibawah dimana

⁹⁾ Extension, op.cit., p. 7-29

bagaiian resistip, induktip dan kecepatan penurunan tegangan didefinisikan sendiri-sendiri.

$$\bar{v}_{qd} = \bar{R} \bar{i}_{qd} + \omega \bar{F} \bar{i}_{qd} + \omega_r \bar{G} \bar{i}_{qd} + p\bar{L} \bar{i}_{qd} \quad (2.81)$$

$$\bar{v}_{qd} = [v_{qs}, v_{ds}, v_{qr'}, v_{dr'}]^T \quad (2.82)$$

$$\bar{i}_{qd} = [i_{qd}, i_{ds}, i_{qr'}, i_{dr'}]^T \quad (2.83)$$

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r' \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

$$\bar{L} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r' & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r' \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} 0 & L_s & 0 & L_m \\ -L_s & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r' \\ -L_m & 0 & L_r' & 0 \end{bmatrix} \quad (2.86)$$

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & -L_r' \\ L_m & 0 & L_r' & 0 \end{bmatrix} \quad (2.87)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_{0a} \\ i_{0r} \\ i_{0s} \\ i_{0x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{p}{\omega_b} X_u \\ -\frac{\omega}{\omega_b} X_u \\ 0 \\ \frac{p}{\omega_b} X_u \\ -\left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) X_u \\ -\left(\frac{\omega - \omega_s}{\omega_b}\right) X_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\omega}{\omega_b} X_u \\ r_s + \frac{p}{\omega_b} X_u \\ 0 \\ \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}\right) X_u \\ \frac{p}{\omega_b} X_u \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ r'_s + \frac{p}{\omega_b} X_u \end{bmatrix}$$

(2.88)

BAB III

OPERASI TAK SEIMBANG DARI MESIN INDUKSI SINETRIS

III.1. ANALISA OPERASI STEADY STATE PADA KONDISI TEGANGAN TIDAK SEIMBANG

Materi yang disajikan dalam bagian ini membahas operasi steady state untuk kondisi sumber tegangan tidak seimbang dengan teori multiple referensi frame ¹⁰⁾. Hal yang utama dalam menganalisa operasi steady state sumber tegangan tidak seimbang sejak kehadiran teknik komputer memungkinkan analisis transien dan elektro mekanis dapat dipelajari secara tepat. Metode simulasi sangat penting untuk mengarahkan studi tentang masalah steady state yang akan dibahas selanjutnya.

Persamaan untuk kondisi sumber tegangan tidak seimbang, yang ditulis dalam bentuk variabel referensi

10) P. C. Krause, "Method of Multiple Reference Frames Applied to the Analysis of Symmetrical Induction Machinery", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. 87 January 1968, pp. 216-227.

frame bebas, dapat dituliskan dalam referensi frame stasioner dengan mengambil $\theta = 0$. Variabel hanya terdiri dari sebuah frekwensi untuk masing-masing harga k . Jika dipakai huruf besar untuk menotasikan variabel steady state kita dapat menulis variabel q_s dan d_s dalam bentuk phasor, untuk $k > 0$, seperti

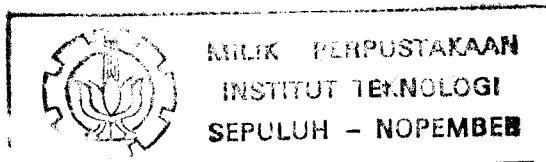
$$\bar{V}_{as+} = (r_s + j \frac{\omega_e}{\omega_b} X_{ls}) \bar{I}_{as+} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} X_M (\bar{I}_{as+} + \bar{I}'_{ar+}) \quad (3. 1)$$

$$\frac{\bar{V}'_{ar+}}{s} = (\frac{r'_r}{s} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} X'_{lr}) \bar{I}'_{ar+} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} X_M (\bar{I}_{as+} + \bar{I}'_{ar+}) \quad (3. 2)$$

dimana

$$s = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} \quad (3. 3)$$

$$\bar{V}_{as-} = (r_s + j \frac{\omega_e}{\omega_b} X_{ls}) \bar{I}_{as-} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} X_M (\bar{I}_{as-} + \bar{I}_{ar-}) \quad (3. 4)$$



$$\frac{\bar{V}'_{ar-}}{2-s} = \left(\frac{r'_r}{s} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} X'_{lr} \right) \bar{I}'_{ar-} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} X_M (\bar{I}_{as-} + \bar{I}'_{ar-}) \quad (3. 5)$$

$$\bar{V}_{ns} = (r_s + j \frac{\omega_e}{\omega_b} X_{ls}) \bar{I}_{0s} \quad (3. 6)$$

$$\bar{V}'_{nr} = [r'_r + j (\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b}) X'_{lr}] \bar{I}'_{Or} \quad (3. 7)$$

$$\bar{F}_{qsk}^s = \bar{F}_{qs+k}^s + \bar{F}_{qs-k}^s \quad (3. 8)$$

$$\bar{F}_{dsk}^s = \bar{F}_{ds+k}^s + \bar{F}_{ds-k}^s \quad (3. 9)$$

dimana persamaan (3. 8) berasal dari (3. 1) dan (3. 9) dari (3. 2). Phasor dengan subskript +k berasal dari penjumlahan pertama pada sisi kanan dari persamaan (3. 1) dan (3. 2); phasor dengan subskrip -k berasal dari penjumlahan kedua. Jelas bahwa persamaan yang identik dapat ditulis untuk variabel rotor dalam referensi frame stasioner; Kita hanya membubuhkan penggantian subskrip s dengan r dan menambahkan keterangan. Hal tersebut dapat

dengan r dan menambahkan keterangan. Hal tersebut dapat ditunjukkan bahwa persamaan diatas tidak berlaku untuk kuantitas konstan (dc) dimana $k = 0$. Hal tersebut bukanlah batasan yang serius karena tegangan dc biasanya digunakan pada stator hanya untuk tujuan pengereman dinamik. Analisa untuk jenis operasi tersebut dapat ditangani sebagai kasus khusus.

Jika kita membahas pers (3. 1) dan (3. 2) bersama dapat dituliskan :

$$\sqrt{2} \bar{F}_{qs+k}^s = F_{qskA} - jF_{qskB} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \sqrt{2} \bar{F}_{ds+k}^s &= F_{dskA} - jF_{dskB} \\ &= j\sqrt{2} \bar{F}_{qs+k}^s \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\sqrt{2} \bar{F}_{qs+k}^s = F_{qskC} - jF_{qskD} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \sqrt{2} \bar{F}_{qs+k}^s &= F_{qskC} - jF_{qskD} \\ &= j\sqrt{2} \bar{F}_{qs+k}^s \end{aligned} \quad (3.13)$$

Sekali lagi jelaslah bahwa pernyataan yang identik dapat

dituliskan untuk variabel rotor dinyatakan dalam referensi frame stasioner. Jika kita mensubstitusikan pers (3.11) dan (3.13) kedalam (3. 9) dapat kita tulis (3. 8) dan (3. 9) sebagai

$$\begin{bmatrix} \bar{F}_{qsk}^s \\ \bar{F}_{dsk}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ j1 & -j1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{F}_{qs+k}^s \\ \bar{F}_{qs-k}^s \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Persamaan tersebut membuat transformasi kompleks untuk sistem dua phasa. Agar sesuai dengan konvensi yang telah kita kembangkan dapat kita tuliskan

$$\bar{F}_{qs+k}^s = S_{2qd} \bar{F}_{qdk}^s \quad (3.15)$$

dimana

$$S_{2qd} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -j1 \\ 1 & j1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

dan $(S_{2qd})^{-1}$ didefinisikan oleh (3.14). Jelas bahwa

$$(\bar{F}_{qs+k}^s)^T = [\bar{F}_{qs+k}^s \quad \bar{F}_{qs-k}^s] \quad (3.17)$$

$$(\bar{F}_{qdk}^s)^T = [\bar{F}_{qsk}^s \quad \bar{F}_{dsk}^s] \quad (3.18)$$

$$\bar{F}_{qr+k}^s = S_{2qd} \bar{F}_{qdrk}^s \quad (3.19)$$

dimana kuantitas diatas dapat didefinisikan dengan merubah subskrip dalam pers (3.17) dan (3.18).

Dalam referensi frame stasioner dengan mengambil $\omega = 0$ dan kemudian untuk kondisi steady state dengan mengambil $p = j\omega_{esk}$, maka

$$\begin{bmatrix} -s \\ V_{qsk} \\ -s \\ V_{dsk} \\ - \\ V_{nsk} \\ -s \\ V_{qrk} \\ -s \\ V_{drk} \\ - \\ V_{nrk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{W}{s} r + j \frac{esk}{W} X_H & 0 & 0 & j \frac{esk}{W} X_H & 0 & 0 \\ 0 & \frac{W}{s} r + j \frac{esk}{W} X_{ss} & 0 & 0 & j \frac{esk}{W} X_H & 0 \\ 0 & 0 & \frac{W}{s} r + j \frac{esk}{W} X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ j \frac{esk}{W} X_H & -\frac{W}{W} X_H & 0 & \frac{W}{r} + j \frac{esk}{W} X_{rr} & -\frac{W}{W} X_{rr} & 0 \\ \frac{W}{W} X_H & j \frac{esk}{W} X_H & 0 & -\frac{W}{W} X_{rr} & \frac{W}{r} + j \frac{esk}{W} X_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{W}{r} + j \left(\frac{esk}{W} X_{lr} \right) X_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -s \\ I_{qsk} \\ -s \\ I_{dsk} \\ - \\ I_{nsk} \\ -s \\ I_{qrk} \\ -s \\ I_{drk} \\ - \\ I_{nrk} \end{bmatrix}$$

(3.20)

Kita akan membahas persamaan tegangan n_{s-} dan n_{r-} secara terpisah. Sebenarnya kita hanya akan berhubungan dengan persamaan tegangan n_s karena diasumsikan untuk kondisi sumber tegangan tidak seimbang $f'_{nrk} = 0$. Jika kita sekarang mensubstitusi invers dari pers (3.15) dan (3.19) dimasukan kedalam (3.20) untuk tegangan dan arus dapat kita tuliskan

$$\begin{bmatrix} \overset{u}{V}_{qs+k} \\ \overset{u,s}{V}_{qr+k} \\ \vdots \\ \overset{u,s}{V}_{qs-k} \\ \overset{u,s}{V}_{qr-k} \\ \vdots \\ \overset{u,s}{V}_{qs-k} \\ \overset{u,s}{V}_{qr-k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overset{u}{r} + \overset{u}{j} \frac{\omega_{esk}}{s} Y_{ss} & \overset{u}{j} \frac{\omega_{esk}}{s} Y_{sr} & 0 & 0 \\ \overset{u}{s} & \overset{u}{b} & \overset{u}{b} & \overset{u}{b} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \overset{u}{r} + \overset{u}{j} \frac{\omega_{esk}}{s} Y_{rr} & \overset{u}{j} \frac{\omega_{esk}}{s} Y_{rs} & 0 & 0 \\ \overset{u}{s} & \overset{u}{b} & \overset{u}{b} & \overset{u}{b} \\ 0 & 0 & \overset{u}{r} + \overset{u}{j} \frac{\omega_{esk}}{s} Y_{ss} & \overset{u}{j} \frac{\omega_{esk}}{s} Y_{sr} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \overset{u}{j} \frac{\omega_{esk}}{s} Y_{sr} & \overset{u}{r} + \overset{u}{j} \frac{\omega_{esk}}{s} Y_{rr} \\ \overset{u}{s} & \overset{u}{b} & \overset{u}{b} & \overset{u}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overset{u,s}{I}_{qs+k} \\ \overset{u,s}{I}_{qr+k} \\ \vdots \\ \overset{u,s}{I}_{qs-k} \\ \overset{u,s}{I}_{qr-k} \\ \vdots \\ \overset{u,s}{I}_{qs-k} \\ \overset{u,s}{I}_{qr-k} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

dimana

$$s_k = \frac{\omega_{esk} - \omega_r}{\omega_{esk}} \quad (3.22)$$

Jelaslah bahwa untuk kondisi seimbang diasumsikan, frekwensi tunggal digunakan tegangan rotor $V_{qr+k} = V_{qr+1}$ jika mesin adalah doubly fed dan $V_{qr-k} = 0$. Karena mesin adalah simetris, kuantitas perputaran positif dan negatif adalah decoupled. Sebenarnya persamaan tegangan yang diturunkan adalah persamaan tegangan urutan positif dan negatif yang mana pertama kali jika mesin adalah doubly fed dan $V_{qr-k} = 0$. Karena mesin diberikan oleh pers (3.1), (3.2), (3.4), dan (3.5).

Jelas bahwa $\bar{F}_{qs+1}^s = \bar{F}_{as+}^s$, $\bar{F}_{qs-1}^s = \bar{F}_{as-}^s$, $\bar{F}_{qr+1}^s = \bar{F}_{ar+}^s$, dan $\bar{F}_{qr-1}^s = \bar{F}_{ar-}^s$.

Sampailah pada akhir dari suatu penyelesaian yaitu menurunkan transformasi motor induksi tiga simetri. Terlihat bahwa \bar{F}_{qsk}^s , \bar{F}_{dsk}^s dan \bar{F}_{nsk}^s dapat direlasikan terhadap \bar{F}_{ask}^s , \bar{F}_{bsk}^s dan \bar{F}_{esk}^s dengan persamaan transformasi yang diberikan dengan $\theta = 0$. Jelas bahwa transformasi tersebut tidak dapat digunakan untuk phasor jika θ merupakan fungsi waktu, hal tersebut bukan persoalan dalam K_s^s . Oleh karenanya

$$\bar{F}_{qdnsk}^s = K_s^s \bar{F}_{abcsk}^s \quad (3.23)$$

dimana

$$\mathbf{K}_s^s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

dengan mensubstitusikan \mathbf{F}_{nsk} kedalam persamaan (3.44) didapatkan

$$\bar{\mathbf{F}}_{qs+kns}^s = \mathbf{S}_{3qd} \bar{\mathbf{F}}_{qdnsk}^s \quad (3.25)$$

dimana

$$\mathbf{S}_{3qd} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -j1 & 0 \\ 1 & j1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$(\bar{\mathbf{F}}_{qs+kns}^s)^T = [\bar{\mathbf{F}}_{qs+k}^s \quad \bar{\mathbf{F}}_{qs-k}^s \quad \bar{\mathbf{F}}_{nsk}^s] \quad (3.27)$$

dari pers (3.53) dan (3.55)

$$\begin{aligned}\overline{F}_{qs+kns}^s &= S_{3qd} K_s^s \overline{F}_{abcsk} \\ &= S \overline{F}_{abcsk}\end{aligned}\quad (3.28)$$

Dimana S adalah transformasi motor induksi untuk sistem tiga phasa. Subskrip k pada persamaan (3.28) untuk menekankan bahwa hubungan tersebut digunakan untuk masing-masing komponen frekwensi dari variabel. Jelas bahwa pers (3.28) juga digunakan untuk kuantitas rotor steady state dinyatakan dalam referensi frame stasioner.

Pernyataan kuantitas phasor phasa stator dinyatakan dari komponen $+k$ dan $-k$ dengan invers dari pers (3.28). Berkenaan dengan sumber tegangan tidak seimbang, variabel phasa rotor akan mengandung dua frekwensi untuk masing-masing harga k seperti dicatat dalam pers (3.21)-(3.23). Karena tidak dipakai transformasi untuk merubah phasor dari referensi frame stasioner ke-referensi frame fixed (tetap) dalam rotor, maka perlu untuk menuliskan bentuk phasor dari pernyataan untuk variabel rotor sesaat. Karena itu dari hubungan persamaan (3.21)-(3.23) dengan persamaan (3.10) dan (3.12) dapatlah ditulis untuk kuantitas q_r dan d_r , yaitu

$$\begin{aligned} \overline{F'}_{ark} = & \overline{[F'_{qr+k}]^s} (\omega_{sk} - \omega_r) + \overline{[F'_{qr-k}]^s} (\omega_{sk} + \omega_r) \\ & + \overline{[F'_{nrk}]} (\omega_{sk} - \omega_r) \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} \overline{F'}_{brk} = & [a \overline{F'}_{qr+k}]^s (\omega_{sk} - \omega_r) + [a \overline{F'}_{qr-k}]^s (\omega_{sk} + \omega_r) \\ & + \overline{[F'_{nrk}]} (\omega_{sk} - \omega_r) \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} \overline{F'}_{crk} = & [a \overline{F'}_{qr+k}]^s (\omega_{sk} - \omega_r) + [a \overline{F'}_{qr-k}]^s (\omega_{sk} + \omega_r) \\ & + \overline{[F'_{nrk}]} (\omega_{sk} - \omega_r) \end{aligned} \quad (3.31)$$

dimana persamaan diatas subskripnya diasosiasikan dengan masing-masing tanda kurung menunjukan frekwensi dari kuantitas sesaat dinyatakan dalam phasor.

Torsi elektro magnetik steady state dapat dinyatakan dalam bentuk komponen phasor referensi frame stasioner :

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{\omega_b X_{ls}} (\varphi_{qs} \varphi_{md} - \varphi_{ds} \varphi_{mq})$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{1}{\omega_b X'_{ls}} (\psi'_{dr} \phi_{mq} - \psi'_{qr} \phi_{md})$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{1}{\omega_b} (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds})$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{1}{\omega_b} (\psi'_{qr} i'_{dr} - \psi'_{dr} i'_{qr})$$

(3.32)

dimana tanda asteris menunjukkan konjugasi persamaan tersebut untuk torsi juga dapat ditulis dalam bentuk urutan phasor; jelasnya $I_{qs+1} = I_{as+}$, dan seterusnya. Torsi dinyatakan dalam per unit jika semuanya arus dan X_m dinyatakan dalam per unit dan $3(P/2)(1/\omega_p)$ dieliminir.

III.2. METODE MULTIPLE REFERENSI FRAME

Metoda multiple referensi frame diperkenalkan pada tahun 1968 sebagai suatu cara untuk menganalisa sumber tegangan tidak seimbang, pengoperasian kecepatan konstan dari mesin induksi simetri¹¹⁾. Metoda tersebut melibatkan

¹¹⁾ P. C. Krause, "Method of Multiple Reference Frames Applied to the Analysis of Symmetrical Induction Machinery", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. 87 January 1968, pp. 218-227.

dua keistimewaan yang tidak ada dalam teknik phasor .

1) Kecepatan konstant elektrik transien sebaik karakteristik steady state yang telah ditentukan dan 2) Perhitungan dibawa kebentuk real dan tidak dalam bilangan kompleks. Konsep multiple referensi frame adalah penerapan secara logik dari sebuah penyelidikan yang dibuat dalam bab sebelumnya. Dari bagian sebelumnya telah dicatat bahwa jika sebuah kumpulan seimbang muncul pada sebarang referensi frame kemudian disana ada referensi frame lain maka muncul kumpulan seimbang tersebut dihadirkan kembali dengan amplitudo keadaan yang bervariasi. Juga kita haruslah berhati-hati karena pada kenyataannya bahwa transformasi variabel tidak seimbang ke-referensi frame bebas menghasilkan urutan dari kumpulan seimbang. Metoda multiple referensi frame berdasar pada kombinasi secara logik dari kedua keistimewaan tersebut. Secara khusus setiap kumpulan keadaan seimbang pada referensi frame bebas muncul dengan amplitudo tertentu (konstan selama kondisi steady state) dalam referensi frame yang mana memutar referensi frame secara sinkron untuk kumpulan tertentu. Prinsip superposisi dapat digunakan untuk perhitungan-perhitungan kecepatan konstan yang mana menghasilkan persamaan-persamaan linier dari mesin. Oleh karena itu kita dapatlah dibahas tiap-tiap kumpulan keadaan seimbang secara terpisah, dimana tiap-tiap set

dapat ditransformasikan pada referensi frame perputaran sinkron dan perhitungan perhitungannya dilaksanakan dengan menggunakan variabel-variabel yang konstan untuk kondisi state variabel. Karena itu suatu bagian terpisah dari referensi frame perputaran sinkron harus digunakan untuk menghitung tiap-tiap kumpulan keadaan seimbang yang memutar negatif dan positif. Oleh karenanya disebut "Multiple referensi frame" .

Meskipun multiple referensi frame dapat digunakan untuk menganalisa semua kondisi keadaan tidak seimbang, konsep ini tidak akan dikembangkan untuk tiap-tiap kasus. Aplikasi teknik tersebut pada kondisi sumber tegangan tidak seimbang akan diberikan secara ringkas . Jika kita ambil $+k$ menandakan referensi frame perputaran sinkron untuk kumpulan keadaan seimbang berputar positif , $-k$ untuk putaran keadaan seimbang negatif. Jika posisi waktu nol dari semua referensi frame sama dengan nol, maka didapatkan:

$$v_{qs}^{+k} = v_{qskA} \quad (3.33)$$

$$v_{ds}^{+k} = v_{qskB} \quad (3.34)$$

$$v_{ds}^{-k} = v_{qskC} \quad (3.35)$$

$$v_{ds}^{-k} = -v_{qskD} \quad (3.36)$$

Tegangan multiple referensi frame dari mesin induksi didapatkan dari persamaan (2.79) dengan ω diatur sama dengan ω_{esk} untuk referensi frame putaran positif dan $-\omega_{esk}$ untuk putaran negatif.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^{+k} \\ v_{qs}^{+k} \\ v_{ds}^{-k} \\ v_{qs}^{-k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{\omega_s} X_{ss} & \frac{\pm \omega_{ref}}{\omega_s} X_{sd} & \frac{p}{\omega_s} X_{sq} & \frac{\pm \omega_{ref}}{\omega_s} X_{sd} \\ -\frac{\pm \omega_{ref}}{\omega_s} X_{sd} & r_s + \frac{p}{\omega_s} X_{ss} & -\frac{\pm \omega_{ref}}{\omega_s} X_{sq} & \frac{p}{\omega_s} X_{sd} \\ \frac{p}{\omega_s} X_{sq} & \left(\frac{\pm \omega_{ref} - \omega_s}{\omega_s} \right) X_{sd} & r_s + \frac{p}{\omega_s} X_{ss} & \left(\frac{\pm \omega_{ref} - \omega_s}{\omega_s} \right) X_{sd} \\ -\left(\frac{\pm \omega_{ref} - \omega_s}{\omega_s} \right) X_{sd} & \frac{p}{\omega_s} X_{sq} & -\left(\frac{\pm \omega_{ref} - \omega_s}{\omega_s} \right) X_{sd} & r_s + \frac{p}{\omega_s} X_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^{+k} \\ i_{qs}^{+k} \\ i_{ds}^{-k} \\ i_{qs}^{-k} \end{bmatrix}$$

(3.37)

Dalam persamaan diatas positif dari tanda plus-minus (+) dipakai untuk semua referensi frame perputaran sinkron positif dan tanda negatif untuk putaran negatif.

Arus-arus multiple referensi frame juga sekeluarga, variabel-variabel arus tersebut disubskription dengan A, B, C dan D oleh (3.33)-(3.36). Oleh karenanya (3.37) dapat digunakan untuk menentukan arus multipel untuk steady state atau kecepatan konstan, kondisi transient. Arus multiple reference frame kemudian disubstitusikan kedalam pernyataan yang baru saja diturunkan untuk arus fasa sesaat. Jelaslah bahwa untuk kondisi steady state p diatur sama dengan nol dalam pers (3.37).

BAB IV

SIMULASI KOMPUTER MESIN INDUKSI

Persamaan diferensial yang menjelaskan kelakuan dinamik dari mesin-mesin listrik adalah non linier dan sampai kedatangannya penganalisaan diferensial mesin pada awal tahun 1940. Sekarang pemecahan dari persamaan tersebut biasa menggunakan komputer digital atau komputer analog. Dalam bab sebelumnya kita menggunakan komputer untuk mengilustrasikan kelakuan dari mesin induksi dalam berbagai mode pengoperasian.

IV.1. SIMULASI MESIN INDUKSI SIMETRI DALAM REFERENSI FRAME TERTENTU

Ada beberapa cara untuk merumuskan persamaan dari mesin induksi untuk tujuan simulasi komputer. Bentuk yang akan kita gunakan adalah yang dilaporkan dalam ¹²⁾

Persamaan yang sesuai untuk simulasi mesin induksi simetri dalam referensi frame tertentu dapat dikembangkan

12) P. C. Krause and R. Thomas. "Simulation of Symmetrical Induction Machinery." IEEE Trans. Power Apparatus and System, Vol. 84, November 1965, pp. 1030-1053

dengan langkah pertama menyelesaikan persamaan fluks linkage atau fluks perdetik untuk arus, maka didapatkan

$$i_{qs} = \frac{1}{X_{ls}} (\psi_{qs} - \psi_{mq}) \quad (4. 1)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{X_{ls}} (\psi_{ds} - \psi_{md}) \quad (4. 2)$$

$$i_{ns} = \frac{1}{X_{ls}} \psi_{ns} \quad (4. 3)$$

$$i'_{qr} = \frac{1}{X'_{lr}} (\psi'_{qr} - \psi_{mq}) \quad (4. 4)$$

$$i'_{dr} = \frac{1}{X'_{lr}} (\psi'_{dr} - \psi_{md}) \quad (4. 5)$$

$$i'_{nr} = \frac{1}{X'_{lr}} \psi'_{nr} \quad (4. 6)$$

dimana ψ_{mq} dan ψ_{md} yang dapat digunakan ketika menyatakan saturasi didefinisikan

$$\psi_{mq} = X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (4. 7)$$

$$\psi_{md} = X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (4. 8)$$

Jika pers (5. 1)-(5. 6) digunakan untuk mengeliminir arus dalam pers (5. 7) dan (5. 8) dan selanjutnya dihasilkan pemecahan untuk fluks linkage perdetik dapat ditulis persamaan integral berikut ini

$$\psi_{qs} = \frac{\omega_b}{p} [v_{qs} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_{qs})] \quad (4.9)$$

$$\psi_{ds} = \frac{\omega_b}{p} [v_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{md} - \psi_{ds})] \quad (4.10)$$

$$\psi_{ns} = \frac{\omega_b}{p} [v_{ns} - \frac{r_s}{x_{ls}} \psi_{ns}] \quad (4.11)$$

$$\psi'_{qr} = \frac{\omega_b}{p} [v'_{qr} - (\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}) \psi'_{dr} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi_{mq} - \psi'_{qr})] \quad (4.12)$$

$$\psi'_{dr} = \frac{\omega_b}{p} [v'_{dr} - (\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b}) \psi'_{qr} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi_{md} - \psi'_{dr})] \quad (4.13)$$

$$\psi_{nr} = \frac{\omega_b}{p} [v_{nr} - \frac{r_r}{x_{lr}} \psi_{nr}] \quad (4.14)$$

persamaan (5. 7) dan (5. 8) sekarang dinyatakan sebagai

$$\psi_{mq} = x_{aq} (\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{qr}}{x'_{lr}}) \quad (4.15)$$

$$\phi_{md} = X_{ad} \left(\frac{\phi_{ds}}{X_{ls}} + \frac{\phi'_{dr}}{X'_{lr}} \right) \quad (4.16)$$

yang mana

$$\begin{aligned} X_{aq} &= X_{ad} \\ &= (1/X_H + 1/X_{ls} + 1/X'_{lr})^{-1} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Dalam simulasi komputer, pers (4.9)-(4.16) digunakan untuk memecahkan masalah fluks linkage per detik dan pers (4.1)-(4.8) digunakan untuk mendapatkan arus dari fluks linkage per detik. Jelas bahwa kasus kuantitas nol, i_{ns} dan i'_{nr} dapat dipecahkan secara langsung dari pers (4.11) dan (4.14), dengan mensubstitusi (4.3) untuk ϕ_{ns} dan (4.6) untuk ϕ'_{nr} kedalam persamaan integral tersebut.

Saturasi torsi elektro magnetik dinyatakan dalam per unit adalah

$$T_e = \phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds} \quad (4.18)$$

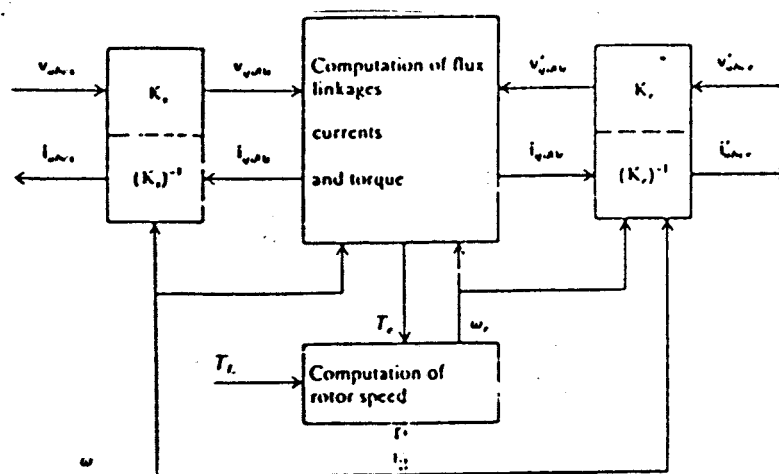
yang mana positif untuk kerja motor. Persamaan yang digunakan untuk menghitung kecepatan rotor didapat

$$\omega_r = \frac{\omega_b}{2H_p} (T_e - T_L) \quad (4.19)$$

Biasanya kecepatan rotor per unit ω_r/ω_b lebih banyak

digunakan dibandingkan ω_r , karena hal tersebut sangat pas digabungkan kedalam persamaan integral fluks linkage.

Blok diagram melukiskan pernyataan komputer dari mesin induksi tiga fasa simetri dalam referensi frame tertentu sebagaimana diberikan dalam gambar .4.1. Persamaan-persamaan mesin yang digunakan dalam simulasi komputer ditunjukkan dengan nomer-nomer dalam blok diagram. Fungsi sinusoidal yang dilibatkan dalam transformasi ditimbulkan dari ω untuk K_s dan $\omega - \omega_r$ untuk K_r .



13)

GAMBAR 4.1.

SIMULASI MOTOR INDUKSI TIGA PHASA
DALAM REFERENSI FRAME BEBAS

13)

P. C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill Book Company, New York 1987, p.460.

IV. 2. SIMULASI MODE PENGOPERASIAN DARI MESIN INDUKSI PADA KONDISI TEGANGAN SUMBER TIDAK SEIMBANG

Presentasi dari mesin induksi dalam referensi frame dalam bentuk simulasi umum dari simulasi untuk sembarang mode pengoperasian praktis akan diturunkan. Meskipun representasi dalam referensi frame dapat digunakan seperti telah dilukiskan pada gambar 4.1 untuk semua mode pengoperasian, simulasi dalam bentuk tersebut lebih dilibatkan dibanding bentuk umumnya. Tergantung pada mode pengoperasian simulasi komputer merupakan pengoperasian dalam rotor stasioner atas referensi frame sinkron. Jika rangkaian rotor adalah seimbang dan jika mesin double fed, tegangan seimbang digunakan pada rotor, kemudian kondisi stator tidak seimbang adalah paling sesuai disimulasi dalam referensi frame stasioner. Hal tersebut bersifat terlihat logik ketika suatu pembahasan, jika referensi frame diletakan dimana terjadi tidak seimbang atau swicthing, hal tersebut jauh lebih mudah dijelaskan secara matematis sebuah diskontinyutas (unbalanced) seperti membuka dan menutup (reclosing) phasa stator atau swicthing dari kontrol rectifier yang dihubungkan pada rangkaian stator.

Sebagai contoh sebuah impedansi $z(p)$ dihubungkan secara seri dengan kumparan as seperti terlihat pada

gambar 4.2 dan yang telah dibahas pada bagian sebelumnya tegangan phasa sumber untuk kasus tersebut selanjutnya didapat secara umum persamaan

$$v_{as} = e_{ga} - 2/3 i_{as} z(p) \quad (4.20)$$

$$v_{bs} = e_{gb} + 1/3 i_{as} z(p) \quad (4.21)$$

$$v_{cs} = e_{gc} + 1/3 i_{as} z(p) \quad (4.22)$$

IV. 3. KONDISI MOTOR INDUKSI PADA SUMBER TEGANGAN TIDAK SEIMBANG

Meskipun hal itu bukan bersifat praktek untuk membahas semua kondisi tidak seimbang yang mungkin terjadi, informasi yang diberikan dalam bagian ini akan disajikan sebagai petunjuk pemecahan pada persoalan. Sumber tegangan tidak seimbang yang besar.

Metode perhitungan performansi steady state selanjutnya diambil dalam masing-masing kasus dan penjejukan komputer diambil untuk menunjukkan performansi dinamik dalam kasus aplikasi tegangan tidak seimbang yang dikhususkan dibahas pada tugas akhir pada bab ini sebagai berikut.

Barangkali kondisi sumber tidak seimbang yang

paling umum adalah sumber tegangan tidak seimbang. Hal itu dapat terjadi dalam sistem tenaga yang mengalami kesalahan atau tidak berfungsinya switching yang menyebabkan kondisi tidak seimbang menjadi ada untuk selang waktu tertentu. Performansi dinamik dari mesin induksi selama tidak seimbang temporer dalam tegangan stator diperlihatkan dalam gambar (3.2) . Disini arus rotor dan stator diplot bersamaan dengan T_e dan ω_r/ω_b . Harga puncak dari tegangan rated dan arus diambil 1.0 pu. Mesin dengan 6 kutub, 3 phasa, 220 volt (line to line), 10 hp, 60 hz. Parameter mesin dinyatakan dalam per unit .

$$\begin{array}{lll} r_s = 0.0453 & X_M = 2.042 & r'_r = 0.0222 \\ X_{ls} = 0.0775 & H = 0.5 \text{ s} & X'_{lr} = 0.0322 \end{array}$$

arus rotor dan stator diperlihatkan berhubungan dengan torsi dan kecepatan rotor. Mesin pada awalnya beroperasi pada torsi dasar dan tegangan seimbang. Untuk mensimulasikan sistem tidak seimbang, tegangan yang digunakan diubah pada saat v_{as} maksimum

$$v_{as} = 0.77 \cos(\omega_e t - 5.1^\circ) \quad (4.22)$$

$$v_{bs} = 0.57 \cos(\omega_e t - 9.3^\circ) \quad (4.23)$$

$$v_{cs} = 0.98 \cos(\omega_e t + 139.2^\circ) \quad (4.24)$$

Dimana tegangan diatas dinyatakan dalam per unit dengan harga puncak dari rated tegangan line-to-neutral dibahas sebagai kesatuan. Mengikuti perubahan dalam tegangan yang dipakai, mesin perlahan-lahan turun karena beban torsi tetap konstan pada harga torsi dasar. Segera sesudah kondisi steady state tidak seimbang dijangkau, tegangan rated dipakai kembali.

Operasi steady state selama kondisi tidak seimbang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.58) untuk menentukan \bar{V}_{qs+1}^s dan \bar{V}_{qs-1}^s . Setelah itu maka harga nilai rms dipilih 1.0 pu, $\bar{V}_{as} = 0.77/-5.1$, $\bar{V}_{bs} = 0.57/-9.3$, dan $\bar{V}_{cs} = 0.98/139.2$. Kita harus hati-hati disini; jika kita mengikuti aturan per unit, dimana phasor dari variabel qdn dapat diperunitkan menggunakan harga maksimum (peak value). Disini kita pilih dasar yang sama karena kita memakai hubungan langsung diantara phasor dari abc dan phasor dari variabel qdn. Persamaan (3.51) dapat digunakan untuk menghitung arus steady state. Torsi kemudian dapat dihitung dengan memakai persamaan (3.62) dengan $k=K=1$. Plot dari berbagai komponen torsi steady state sebagai fungsi kecepatan diperlihatkan dalam gambar 3.4. Diperlihatkan konstanta komponen torsi seimbang yang berputar secara urutan positif (positif sequence) yang ditandai $T_{e(+)}$. Komponen yang ditandai $T_{e(-)}$ adalah komponen urutan negatif; $T_{e(avg)}$ adalah rata-rata torsi tidak

seimbang yang merupakan penjumlahan aljabar dari $T_{e(+)}$ dan $T_{e(-)}$. $|T_{e(pul)}| = 1.0$ pu adalah harga mutlak dari komponen pulsating dimana frekwensinya bervariasi sampai dua kali frekwensi sumber. Operasi tidak seimbang steady state yang diamati dalam gambar 3.4 berhubungan dengan titik kerja pada gambar 3.5. dimana $T_{e(avg)} = 1.0$ pu. Penting untuk dicatat adalah pulsating torsi sama dengan nol pada saat mati/berhenti.

IV.4. PERHITUNGAN STEADY STATE PADA MOTOR INDUKSI TIGA PHASA TEGANGAN TIDAK SEIMBANG

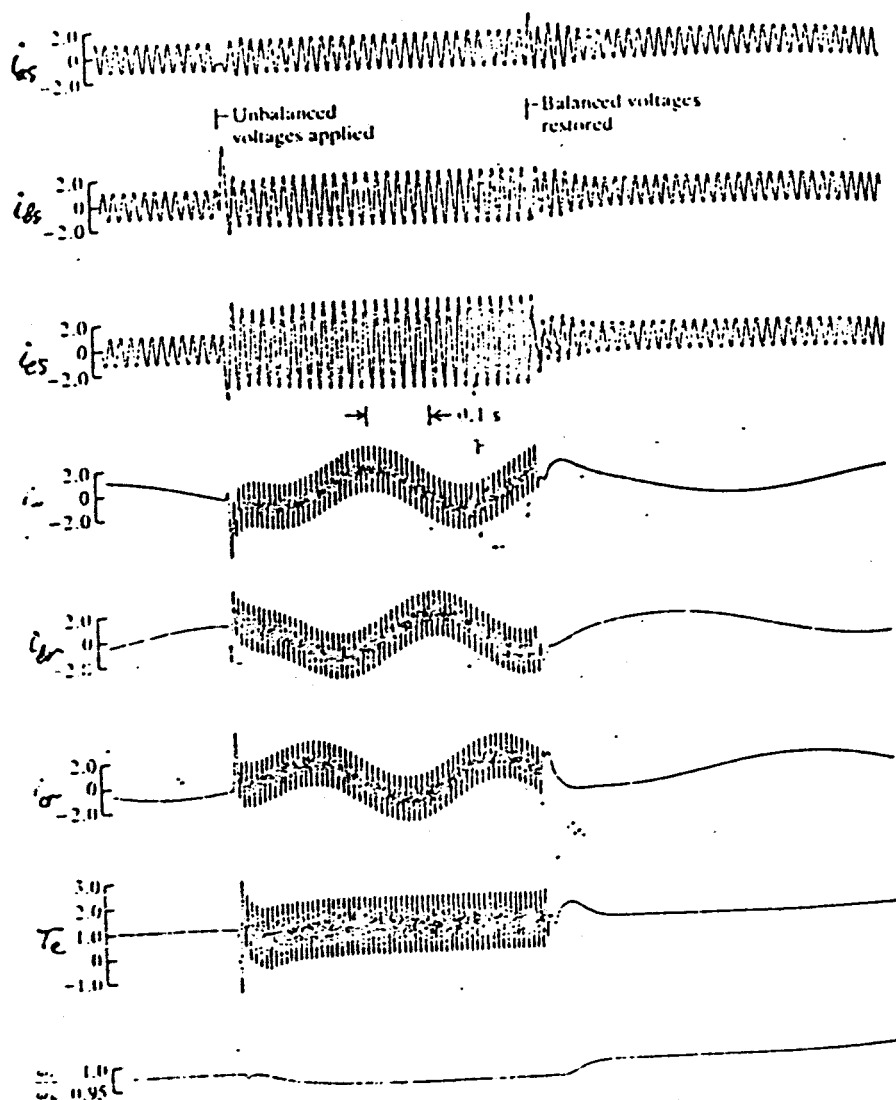
Persamaan-persamaan yang menyatakan keadaan motor induksi tiga kawat dalam reference frame perputaran sinkron didapatkan dengan mengatur persamaan-persamaan umum dari transformasi

$$v_{qs}^e = r_s i_{qs}^e + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds}^e + \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs}^e \quad (4.25)$$

$$v_{ds}^e = r_s i_{ds}^e - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs}^e + \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds}^e \quad (4.26)$$

$$v_{ns}^e = r_s i_{ns}^e + \frac{p}{\omega_b} \psi_{ns}^e \quad (4.27)$$

$$v_{qr}^e = r_r i_{qr}^e + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi_{dr}^e + \frac{p}{\omega_b} \psi_{qr}^e \quad (4.28)$$

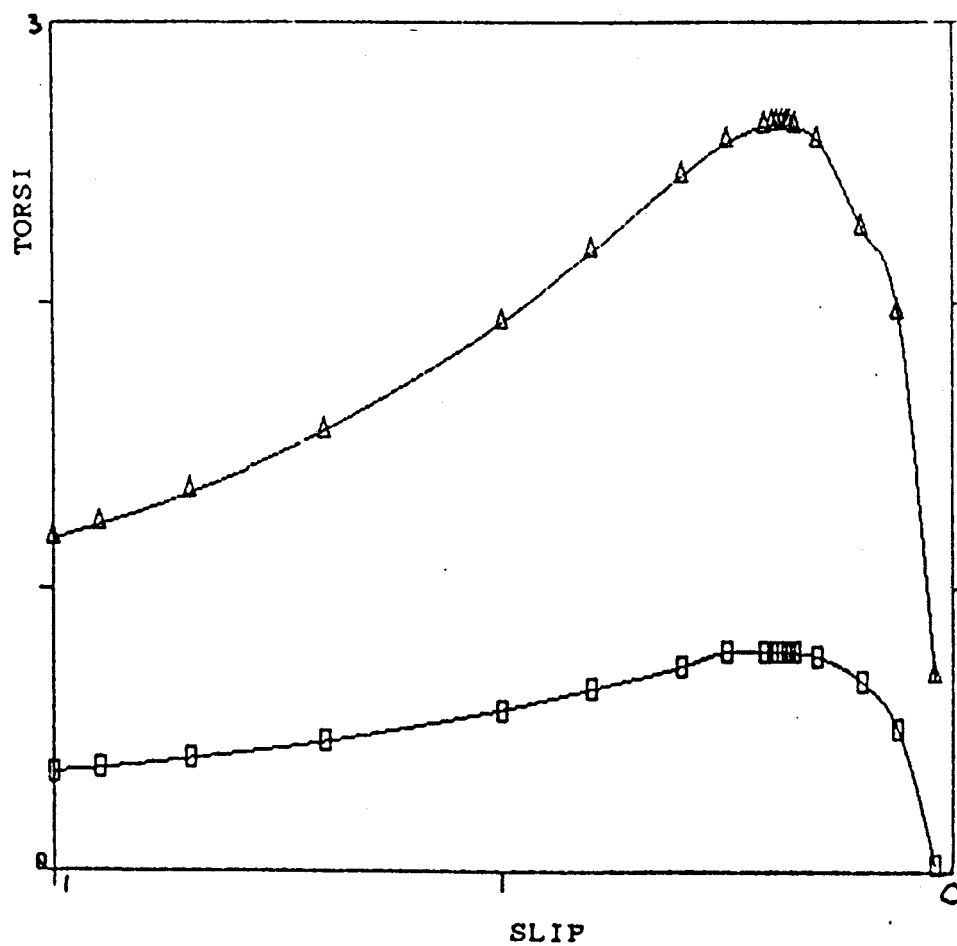


GAHBAR 4.2 14).

PERFORMANSI MOTOR INDUKSI 10 HP PADA
SUMBER TEGANGAN TIDAK SEIMBANG

14)

ibid, p.378.



- ▲ SUMBER TEGANGAN TIDAK SEIMBANG
 ■ SALAH SATU JEPITAN SUMBER TEGANGAN TERBUKA

GAMBAR 4.3
 PERFORMANCE TORSI - SLIP MOTOR INDUKSI YANG DISUPLAI
 TEGANGAN TIDAK SEIMBANG

$$v_{dr}^e = r_r i_{dr}^e - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi_{qr}^e + \frac{p}{\omega_b} \psi_{dr}^e \quad (4.29)$$

$$v_{nr}^e = r_r i_{nr}^e + \frac{p}{\omega_b} \psi_{nr}^e \quad (4.30)$$

$$\psi_{qs}^e = x_{ls} i_{qs}^e + x_{mgu} (i_{qs}^e + i_{qr}^e) \quad (4.31)$$

$$\psi_{ds}^e = x_{ls} i_{ds}^e + x_{mgu} (i_{ds}^e + i_{dr}^e) \quad (4.32)$$

$$\psi_{qr}^e = x_{lr} i_{qr}^e + x_{mgu} (i_{qs}^e + i_{qr}^e) \quad (4.33)$$

$$\psi_{dr}^e = x_{lr} i_{dr}^e + x_{mgu} (i_{ds}^e + i_{dr}^e) \quad (4.34)$$

Pada saat tegangan tegangan yang diberikan seimbang dan sinusoidal, tegangan tegangan yang diberikan menjadi konstan dalam reference frame perputaran sinkron.

Ketika tegangan yang diberikan konstan, maka dalam keadaan steady state

$$\frac{p}{\omega_b} \psi_{qs}^e = \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds}^e = \frac{p}{\omega_b} \psi_{qr}^e = \frac{p}{\omega_b} \psi_{dr}^e = 0$$

Persamaan-persamaan aljabar diatas dalam bentuk matriks dapat ditulis. Persamaan diatas dapat diubah dalam bentuk

$$0 = -\phi_{qso}^e + (x_{ls} + x_{mgu}^e) i_{qso}^e + x_{mgu}^{,e} i_{gro}^e$$

$$0 = -\phi_{qso}^e + (x_{ls} + x_{mgu}^e) i_{qso}^e + x_{mgu}^{,e} i_{gro}^e$$

$$0 = -\phi_{qso}^e + (x_{ls} + x_{mgu}^e) i_{qso}^e + x_{mgu}^{,e} i_{gro}^e$$

$$0 = -\phi_{qso}^e + (x_{ls} + x_{mgu}^e) i_{qso}^e + x_{mgu}^{,e} i_{gro}^e$$

$$v_{qso}^e = r_s i_{qso}^e + \frac{\omega_e}{\omega_b} \phi_{ds}^e$$

$$v_{ds}^e = r_s i_{ds}^e - \frac{\omega_e}{\omega_b} \phi_{qso}^e$$

$$v_{gro}^{,e} = r_r i_{gro}^{,e} + \frac{(\omega_e - \omega_b)}{\omega_b} \phi_{dro}^{,e}$$

$$v_{dro}^{,e} = r_r i_{dro}^{,e} + \frac{(\omega_e - \omega_b)}{\omega_b} \phi_{qgro}^{,e}$$

dimana sebagai contoh v_{qso}^e , i_{qso}^e , ϕ_{qso}^e harga-harga titik operasi keadaan steady state dari tegangan, arus dan fluks linkage sumbu q stator.

BAB V

KESIMPULAN

Dalam tugas akhir ini telah dikembangkan suatu model matematis dari mesin induksi. Persamaan-persamaan dalam model diturunkan melalui suatu perubahan kedalam suatu sumbu koordinat D-Q-N. Model mesin induksi yang telah diturunkan dapat digunakan untuk analisa steady state maupun analisa transient, untuk sistim dengan sinusoidal power suplai, serta untuk sistim yang tidak seimbang yang telah dibahas pada bab IV dengan mensimulasikan untuk penyelesaian dengan perhitungan komputer maka kita dapat hasil-hasilnya yang memungkinkan menghitung semua tegangan, torsi, serta arus-arus yang dapat secara langsung dihitung dengan persamaan Krause. Perhitungan dengan memper unit kan dan dalam bentuk perkalian matriks akan mempercepat proses output nya.

Khusus untuk performance slip-torsi dan torsi-kecepatan dari contoh masih dalam batas kondisi yang diijinkan dan dari hasil perhitungan bahwa untuk slip 0

sampai 0.19 keadaan torsi menanjak terus sedangkan pada slip 0.19 sampai 1.0 maka kecenderungan akan turun terus dan jika kita bandingkan dengan keadaan seimbangnya maka dapat dikatakan masih dalam batas-batas yang diijinkan.

DAFTAR KEPUSTAKAAN

1. C. L. Fortesque, "Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the solution of Polyphase Network," AIEE Trans., vol. 37, 1918.
2. Extension, "Dynamic and Control AC Drive", Course Outline at University of Wisconsin, 1983.
3. E. Clarke, Circuit analysis of A-C Power Systems, vol. I and II, John Wiley and sons, Inc., New York. N.Y., 1943 and 1950.
4. P. C. Krause, "The Methode of Symmetrical Components Derived by Reference Frame Theory," IEEE Trans. Power Apparatus of Systems, Vol. 104, June 1985.
5. P. C. Krause, "Methode of Multiple Reference Frames Applied to the Analysis of Symmetrical Induction Machinery," IEEE Trans. Power Apparatus and System, vol. 87, January 1968.
6. P. C. Krause and H. Thomas. "Simulation of Symmetrical Induction Machinery. "IEEE Trans. Power Apparatus and System, Vol. 84, November 1965.
7. P. C. Krause, "Analysis of Electric Machinery" McGraw-Hill Book Company, New York 1987.
8. T. A. Lipo, "Electric Drive", class note, University of Wisconsin, 1984.
9. V. W. Lyon, Transient Analysis of Alternating Current-Machinery, Technology Press of MIT and John Wiley and sons, Inc., New York, N.Y., 1954.

LAMPIRAN I

USULAN TUGAS AKHIR
=====

A. Judul : ANALISA STEADY STATE PADA MOTOR INDUKSI YANG
DISUPLAI SUMBER TEGANGAN TIDAK SEIMBANG

B. Ruang Lingkup : Mesin Arus Bolak - balik
Penggunaan Komputer dalam Sistem tenaga.

C. Latar belakang : Untuk mendapatkan performance yang lebih baik dari motor induksi tiga fasa yang diperlukan suplai tegangan tiga fasa yang simetris.
Dalam prakteknya sering dijumpai tegangan suplai yang tidak seimbang atau mesinnya yang kadang-kadang tidak seimbang, maka hendak diselidiki performance motor induksi yang disuplai tegangan tidak seimbang. Juga akan dihitung harga-harga steady state dari variabel arus dan tegangan untuk mengetahui apakah harga arus dan tegangan tersebut tidak melebihi harga nominalnya.

D. Permasalahan : Kita hendak meneliti performance motor induksi bila disuplai tegangan tidak seimbang, dalam hal ini sampai sejauh mana besaran-besaran arus dan tegangan bisa ditolerir, yang disebabkan oleh kondisi sumber.

E. Pembahasan : Dalam analisa menggunakan sistem sumbu koordinat D Q N.

F. Langkah-langkah: 1. Studi literatur tentang motor induksi.

2. Analisa performance motor induksi yang disuplai tegangan tidak seimbang.

3. Bila perlu mencocokkan dengan hasil di laboratorium.

4. Penyusunan buku.

5. Selesai.

G. Relevansi : Dapat dikembangkan model simulasi untuk keperluan analisa steady dan keadaan transien untuk keadaan seimbang maupun tidak seimbang dengan menggunakan komputer.

H. Jadwal kegiatan:

Bulan ke	I	II	III	IV	V	VI
kegiatan						
Persiapan	#####					
Study literatur		#####				
Pembahasan			#####			
Percobaan lab				#####		
Penyusunan					#####	

LAMPIRAN II

```

$DEBUG
C234567
C      PENYELESAIAN ANALISA STEADY STATE MOTOR INDUKSI
C      PADA TEGANGAN TIDAK SEIMBANG MENGGUNAKAN
C      REFERENCE FRAME KOORDINAT SUMBU D-Q-N.
C      PERSAMAAN MESIN DALAM SKALA PER UNIT.
C      DATED 24/4/88, T.A.L.
C
C
C      BY: NIKITA SAYANGBATI      NRP: 2852200315
C-----
C-----
C      DIMENSION ZO(12,12),YO(12),XO(12),XOLD(12),DERIVOLD(12)
C      DIMENSION SKRATCH(12),DERIV(12),X(12)
C      REAL KW,KVAR,KVA,ISEQ
C      REAL IS,IR,IQS,IDS,IQR,IDR,INS,INR
C----- DECLARE FILENAMES -----
C      WRITE(*,*)' INPUT THE OUTPUT FILENAME'
C      READ(*,*)OUTPUT
C-----
C----- INITIALIZE THESE VARIABLES -----
C      PI = 4.*ATAN(1.)
C      A120 = 2.*PI/3.
C-----
C----- READ DATA FROM THE TTY -----
62  WRITE(*,*)' INPUT KW OUTPUT, KVA INPUT, H CONSTANT, F BASE'
    READ(9,*)KW,KVA,H,FB
    WRITE(*,*)' INPUT, RS, RR, XLS, XLR, XM'
    READ(9,*)RS,RR,XLS,XLR,XM
    PWRRATIO = KVA/KW
    WRITE(*,5)
    WRITE(*,301) FB,KW,KVA,RS,RR,XLS,XLR,XM,H
301  FORMAT(1H1,39H PU MOTOR PARAMETERS AT DESIGN POINT OF,/,
&4H FE=,F10.4,4H KW=,F10.4,5H KVA=,F10.4//1H ,8X,2HRS,
&8X,2HRR,7X,3HXLS,7X,3HXLR,8X,2HXM/,1X,5F10.4,
* //1H ,20HINERTIA CONSTANT H =F10.4,5H SECS)
    WRITE(*,5)
666  WRITE(*,*)' INPUT VAS,VBS,VCS IN PU,FE IN HERTZ'
    READ(*,*)VAS,VBS,VCS,FES
    WRITE(*,*)' ROTOR EXITATION YES(=1) OR (NO=0)'
    READ(*,*)IANSWR
    IF(IANSWR.EQ.1)GO TO 102
    VAR = 0.
    VBR = 0.
    VCR = 0.
    FER = 0.
    THETAR = 0.
    ISEQ = 1.
    GO TO 40

```

```

102  WRITE(*,*)'INPUT VAR,VBR,VCR,FER,THETAR'
      READ(*,*)VAR,VBR,VCR,FER,THETAR
      WRITE(*,*)'INPUT ROTOR PHASE ROTATION'
      WRITE(*,*)'+1 POS. ROT, -1 NEG. ROT.'
      READ(*,*)ISEQ
      WRITE(*,302) VAR,VBR,VCR,FER
302  *  FORMAT(18H ROTOR VOLTS VAR=,F8.4,3H PU,6H VBR=,F8.4,
      *  6H VCR=,F8.4/,17H ROTOR FREQUENCY ,F8.4,3H HZ)
      IF(ISEQ.GT.0) GO TO 10
      WRITE(*,303)
303  *  FORMAT(33H COUNTER CLOCKWISE PHASE ROTATION)
      GO TO 20
10   *  WRITE(*,304)
304  *  FORMAT(25H CLOCKWISE PHASE ROTATION)
20   *  IF(THETAR.GT.0.0) GO TO 30
      THETARN=-THETAR
      WRITE(*,305) THETARN
305  *  FORMAT(22H INITIAL ROTOR ANGLE =,F8.4,8H LAGGING)
      GO TO 40
30   *  WRITE(*,306) THETAR
306  *  FORMAT(22H INITIAL ROTOR ANGLE =,F8.4,8H LEADING)
C-----
C----- DEFINE ANGULAR FREQUENCIES AND ANGLES -----
40   *  WB = 2.*PI*FB
      WES=2.*PI*FES
      WER=2.*PI*FER
50   *  THETR=-THETAR*PI/180.
C-----
C----- TRANSFORM STATOR VOLTAGES ASSUME VAS=VS*COS(WES*T) -----
      VQS=2./3.*(VAS*COS(WES)+VBS*COS(WES-A120)+VCS*COS(WES+A120))
      VDS=2./3.*(VAS*SIN(WES)+VBS*SIN(WES-A120)+VCS*SIN(WES+A120))
      VNS=SQRT(2.)/3.*(VAS+VBS+VCS)
C-----
C----- TRANSFORM ROTOR VOLTAGES ASSUME VAR=VR*COS(WER*T*THETR) -----
      VQR=-2./3.*ISEQ*(VAR*COS(THETR)+VBR*COS(THETR-A120)+
      *  VCR*COS(THETR+A120))
      VDR=-2./3.*ISEQ*(VAR*SIN(THETR)+VBR*SIN(THETR-A120)+
      *  VCR*SIN(THETR+A120))
      VNR=SQRT(2.)/3.*(-ISEQ)*(VAR+VBR+VCR)
C-----
C----- CALCULATE INITIAL CONDITION -----
445  *  WRITE(*,*)'INPUT INITIAL CONDITION VIA TTY YES OR NO'
      READ(*,*)IANSWR
      IF(IANSWR.NE.1)GO TO 61
      WRITE(*,*)'INPUT PSIQS,PSIDS,PSINS,PSIGR,PSIDR,PSINR,SLIP'
      READ(*,*)X(1),X(2),X(3),X(4),X(5),X(6),SLIP
      GO TO 442
61   *  IF(VR.EQ.0.0) GO TO 60
      SLIP = -FER/FES*ISEQ
      GO TO 70
60   *  WRITE(*,*)'PU SLIP'

```

READ(*,*)SLIP

C-----
C----- ASSEMBLE MATRICES -----

```

70      DO 90 I=1,12
        DO 80 J=1,12
80      ZO(I,J)=0.0
90      YO(I)=0.0
        ZO(1,1)=XLS+XM
        ZO(2,2)=ZO(1,1)
        ZO(3,3)=XLS
        ZO(4,4)=XLR+XM
        ZO(5,5)=ZO(4,4)
        ZO(6,6)=XLR
        ZO(1,4)=XM
        ZO(2,5)=XM
        ZO(4,1)=XM
        ZO(5,2)=XM
        ZO(7,1)=RS
        ZO(8,2)=RS
        ZO(9,3)=RS
        ZO(10,4)=RR
        ZO(11,5)=RR
        ZO(12,6)=RR
        ZO(1,7)=-1.0
        ZO(2,8)=-1.0
        ZO(3,9)=-1.0
        ZO(4,10)=-1.0
        ZO(5,11)=-1.0
        ZO(6,12)=-1.0
        ZO(8,7)=-FES/FB
        ZO(7,8)=-ZO(8,7)
        ZO(9,9)=ZO(7,8)
        ZO(10,11)=SLIP*ZO(7,8)
        ZO(11,10)=-ZO(10,11)
        ZO(12,12)=ZO(10,11)
        YO(7)=VQS
        YO(8)=VDS
        YO(9)=VNS
        YO(10)=VQR
        YO(11)=VDR
        YO(12)=VNR

```

C-----
C----- PROCESS MATRICES -----

```

C      CALL MTINV(ZO,SKRATCH)
C      DO 909 I = 1,12
C      DO 909 J = 1,12
C909   WRITE(*,*)'ZO(I,J)= ',ZO(I,J)
        DO 440 I = 1,12
        XO(I) = 0.
        DO 440 J = 1,12
440    XO(I) = XO(I) + ZO(I,J)*YO(J)

```

```

      TE =PWRRATIO*(XO(10)*XO(5)-XO(11)*XO(4))
      PSIQS=XO(7)
      PSIDS=XO(8)
      PSINS=XO(9)
      PSIS = SQRT(PSIQS**2+PSIDS**2+PSINS**2)
      WRITE(*,418)TE,PSIS
418    FORMAT(12H PU TORQUE =,F10.4,5X,13HSTATOR FLUX =,F10.4,/,
      & /,33H CONDITION ACCEPTABLE?,YES OR NO )
      READ(*,*)IANSWR
      IF(IANSWR.EQ.1)GO TO 100
      IF(VR.EQ.0.0) GO TO 60
      WRITE(*,*)'INPUT NEW VAR,VBR,VCR,THETAR'
      READ(*,*)VAR,VBR,VCR,THETAR
      GO TO 50

C-----
C----- PRINT THE INITIAL CONDITIONS -----
*100    WRITE(*,307) XO
307    FORMAT(8X,3HIQS,7X,3HIDS,7X,3HINS,7X,3HIQR,7X,3HIDR,7X,3HINR/
      * ,1H ,6F10.4//
      & ,6X,5HPSIQS,5X,5HPSIDS,5X,5HPSINS,5X,5HPSIQR,5X,5HPSIDR,
      * 5X,5HPSINR/,1H ,6F10.4//)
      WRPU = (1.-SLIP)*FES/FB
      WRITE(*,308) VQS,VDS,VNS,VQR,VDR,VNR
308    FORMAT(8X,3HVQS,7X,3HVDS,7X,3HVNS,7X,3HVQR,7X,3HVDR,7X,3HVNDR/
      * ,1H ,6F10.4//)
      PSIS = SQRT(XO(8)**2+XO(7)**2+XO(9)**2)
      PSIR = SQRT(XO(11)**2+XO(10)**2+XO(12)**2)
      VS = SQRT(VQS**2+VDS**2+VNS**2)
      VR = SQRT(VQR**2+VDR**2+VNR**2)
      PSIM = SQRT((XO(7)-XLS*XO(1))**2+(XO(8)-XLS*XO(2))**2)
      IS = SQRT(XO(1)**2+XO(2)**2+XO(3)**2)
      IR = SQRT(XO(5)**2+XO(4)**2+XO(6)**2)
      WRITE(*,309) IS,IR,VS,VR,PSIS,PSIR,PSIM,WRPU
309    FORMAT(9X,2HIS,8X,2HIR,8X,2HVS,8X,2HVR,/,1H ,4F10.4//,
      & 7X,4HPSIS,6X,4HPSIR,6X,4HPSIM,/,1H ,3F10.4,/,
      & 11H PU SPEED =,F10.4//)

C-----
C----- TRANSFER INITIAL CONDITIONS -----
C          X(1)=PSIQS          X(2)=PSIDS
C          X(3)=PSIQR          X(4)=PSIDR
C          X(5)=ROTOR SPEED    X(6)=ROTOR ANGLE
C-----

      X(1)=XO(7)
      X(2)=XO(8)
      X(4)=XO(10)
      X(5)=XO(11)
442    X(7) = (1.-SLIP)*FES/FB
      X(8)=0.0

C-----
C----- INPUT CONSTANTS FOR RK2 ITERATION -----
      IF(SLIP.LE.1.)GO TO 60

```

```

IF(SLIP.GT.1.)GO TO 666
WRITE(*,5)
WRITE(*,*)'TRANSIENT SOLUTION YES OR NO'
READ(*,*)IANSWR
IF(IANSWR.NE.1) GO TO 220
WRITE(*,*)'PU LOAD TORQUE'
READ(*,*)TL
WRITE(*,*)'INTEGRATING INTERVAL'
READ(*,*)TSTEP
WRITE(*,*)'PRINT INTERVAL'
READ(*,*)TPRINT
WRITE(*,*)'STOP TIME'
READ(*,*)TSTOP
P=0.0
T=0.0
ASSIGN 110 TO IRETRN
GO TO 230
110    ASSIGN 120 TO IRETRN
GO TO 250
120    ASSIGN 130 TO IRETRN
GO TO 240
C-----
C-----STARTS HERE-----
130    DO 140 I=1,12
        XOLD(I)=X(I)
        DERIVOLD(I)=DERIV(I)
140    X(I)=X(I)+TSTEP*DERIV(I)
        T=T+TSTEP
        ASSIGN 150 TO IRETRN
        GO TO 240
150    DO 160 I=1,6
160    X(I)=XOLD(I)+TSTEP/2.0*(DERIVOLD(I)+DERIV(I))
        P=P+TSTEP
        IF(P+TSTEP/5.0.GT.TPRINT) GO TO 170
        GO TO 120
170    P=0.0
        ASSIGN 180 TO IRETRN
        GO TO 280
180    IF(T+TSTEP/5.0.GT.TSTOP) GO TO 190
        GO TO 120
190    WRITE(*,5)
        WRITE(*,*)'MORE OUTPUT REQUIRED YES OR NO'
        READ(*,*)IANSWR
        IF(IANSWR.NE.1) GO TO 220
        WRITE(*,*)'INPUT NEW TPRINT,TSTOP,TL'
        READ(*,*)TPRINT,TSTOP,TL
        GO TO 120
220    WRITE(*,5)
        WRITE(*,*)'BEGIN NEW RUN WITH OLD DATA?,YES OR NO'
        READ(*,*)IANSWR
        IF(IANSWR.EQ.1) GO TO 445

```

```

WRITE(*,*)'BEGIN NEW RUN WITH NEW DATA?,YES OR NO'
READ(*,*)IANSWR
IF(IANSWR.EQ.1) GO TO 62
5    FORMAT(//)
    GO TO 551
C-----
C---  SUBROUTINES -----
230  XSTAR=1./(1./XLS+1./XLR+1./XM)
C-----
C----- TRANSFORM ROTOR VOLTAGES -----
240  THETSLIP = WES*T- WB*X(8) + THETR
    VQR=-ISEQ*2.*VR/3.*(COS(WER*T)*COS(THETSLIP)
    & +COS(WER*T+ISEQ*A120)*COS(THETSLIP-A120)
    & +COS(WER*T-ISEQ*A120)*COS(THETSLIP+A120))
    VDR=-ISEQ*2.*VR/3.*(COS(WER*T)*SIN(THETSLIP)
    & +COS(WER*T+ISEQ*A120)*SIN(THETSLIP-A120)
    & +COS(WER-ISEQ*A120)*SIN(THETSLIP+A120))
    PSIMQ=XSTAR*(X(1)/XLS+X(4)/XLR)
    PSIMD=XSTAR*(X(2)/XLS+X(5)/XLR)
    PSIMN=XSTAR*(X(3)/XLS+X(6)/XLR)
    DERIV(1)=WB*(VQS-FES/FB*X(2)+RS*(PSIMQ-X(1))/XLS)
    DERIV(2)=WB*(VDS+FES/FB*X(1)+RS*(PSIMD-X(2))/XLS)
    DERIV(3)=WB*(VQR-(FES/FB-X(7))*X(5)+RR*(PSIMQ-X(4))/XLR)
    DERIV(4)=WB*(VDR+(FES/FB-X(7))*X(4)+RR*(PSIMD-X(5))/XLR)
    IQS=(X(1)-PSIMQ)/XLS
    IDS=(X(2)-PSIMD)/XLS
    INS=(X(3)-PSIMN)/XLS
    INR=(X(6)-PSIMN)/XLR
    IQR=(X(4)-PSIMQ)/XLR
    IDR=(X(5)-PSIMD)/XLR
    TE=(X(4)*IDR-X(5)*IQR)*PWRRATIO
    DERIV(5) = (TE-TL)/(2.*H)
    DERIV(6)=X(7)
    GO TO IRETRN
C-----
C----- PRINT SUBROUTINE-HEADINGS -----
250  WRITE(*,310)
310  FORMAT(7X,4HTIME,4X,6HTORQUE,5X,5HSPEED,2X,8HA.G.FLUX,3X,
    & 7HCURRENT,4X,5HPOWER)
    WRITE(*,5)
C-----
C----- PRINT SUBROUTINE--DATA -----
280  KW=VDS*IDS+VQS*IQS+VNS*INS
    PSIM = SQRT(PSIMQ**2+PSIMD**2+PSIMN**2)
    IS = SQRT(IQS**2+IDS**2+INS**2)
    WRITE(*,313) T,TE,X(5),PSIM,IS,KW
313  FORMAT(1H ,6F10.3)
    GO TO IRETRN
551  STOP
    END

```



```
C
C SUBROUTINE MEMBALIK MATRIK
C
C234567890
      SUBROUTINE MTINV(ZO,SKRATCH)
      DIMENSION ZO(12,12),SKRATCH(12)
      N=12
      DO 220 I=1,N
      IF(ZO(I,I).EQ.0.)GO TO 51
      SKRATCH(I)=ZO(I,I)
      ZO(I,I)=1.
      DO 222 J=1,N
      ZO(I,J)=ZO(I,J)/SKRATCH(I)
222  CONTINUE
      DO 230 K=1,N
      IF(K.EQ.I)GO TO 230
      T=ZO(K,I)
      ZO(K,I)=0.0
      DO 240 L=1,N
      ZO(K,L)=ZO(K,L)-ZO(I,L)*T
240  CONTINUE
230  CONTINUE
220  CONTINUE
      GO TO 52
      51  WRITE(*,53)
      53  FORMAT(5X,'DIAGONAL MATRIKNYA ADA YANG BERTARUA NOL')
      52  RETURN
      END
```

LAMPIRAN III

Identities Useful in AC Machine Analysis

1. $\sin^2 A + \cos^2 A = 1$
2. $\sin(A \pm B) = \sin A \cos B \pm \cos A \sin B$
3. $\cos(A \pm B) = \cos A \cos B \mp \sin A \sin B$
4. $\sin A \cos B = 1/2 [\sin(A + B) + \sin(A - B)]$
5. $\cos A \cos B = 1/2 [\cos(A + B) + \cos(A - B)]$
6. $\sin A \sin B = 1/2 [\cos(A - B) - \cos(A + B)]$
7. $\cos A + \cos(A - 2\pi/3) + \cos(A + 2\pi/3) = 0$
8. $\sin A + \sin(A - 2\pi/3) + \sin(A + 2\pi/3) = 0$
9. $\cos^2 A + \cos^2(A - 2\pi/3) + \cos^2(A + 2\pi/3) = 3/2$
10. $\sin^2 A + \sin^2(A - 2\pi/3) + \sin^2(A + 2\pi/3) = 3/2$
11. $\cos A \cos(A - 2\pi/3) + \cos(A - 2\pi/3) \cos(A + 2\pi/3)$
 $+ \cos(A + 2\pi/3) \cos A = -3/4$
12. $\sin A \sin(A - 2\pi/3) + \sin(A - 2\pi/3) \sin(A + 2\pi/3)$
 $+ \sin(A + 2\pi/3) \sin A = -3/4$
13. $\sin A \cos A + \sin(A - 2\pi/3) \cos(A - 2\pi/3)$
 $+ \sin(A + 2\pi/3) \cos(A + 2\pi/3) = 0$

Identities Useful In AC Machine Analysis (Cont'd)

$$14. \quad \sin A \cos (A + 2\pi/3) + \sin (A - 2\pi/3) \cos A \\ + \sin (A + 2\pi/3) \cos (A - 2\pi/3) = -\frac{3\sqrt{3}}{4}$$

$$15. \quad \sin A \cos (A - 2\pi/3) + \sin (A - 2\pi/3) \cos (A + 2\pi/3) \\ + \sin (A + 2\pi/3) \cos A = \frac{3\sqrt{3}}{4}$$

$$16. \quad \cos A \cos B + \cos (A - 2\pi/3) \cos (B - 2\pi/3) \\ + \cos (A + 2\pi/3) \cos (B + 2\pi/3) = \frac{3}{2} \cos (A - B)$$

$$17. \quad \sin A \sin B + \sin (A - 2\pi/3) \sin (B - 2\pi/3) \\ + \sin (A + 2\pi/3) \sin (B + 2\pi/3) = \frac{3}{2} \cos (A - B)$$

$$18. \quad \sin A \cos B + \sin (A - 2\pi/3) \cos (B - 2\pi/3) \\ + \sin (A + 2\pi/3) \cos (B + 2\pi/3) = \frac{3}{2} \sin (A - B)$$

LAMPIRAN IV

PU MOTOR PARAMETERS AT DESIGN POINT OF
 FE= 60.0000 KW= 7.4570 KVA= 7.4570

RS	RR	XLS	XLR	XM
.0453	.0222	.0775	.0322	2.0420

INERTIA CONSTANT H = .5000 SECS

INPUT VAS,VBS,VCS IN PU,FE IN HERTZ
 0.77,0.57,-0.74,60.

ROTOR EXCITATION YES(=1) OR (NO=0)

0

INPUT INITIAL CONDITION VIA TTY YES OR NO

0

PU SLIP

0.02

PU TORQUE = .6900 STATOR FLUX = .9298

CONDITION ACCEPTABLE?.YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
.8495	-.3214	2.3033	-.5185	.5939	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.7418	.5315	.1785	.6592	.5756	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
2.4759	.7884	.9894	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.9298	.8751	.8755

PU SPEED = .9800

PU SLIP

0.06

PU TORQUE = 1.6975 STATOR FLUX = .8746

CONDITION ACCEPTABLE?, YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
1.9245	-1.0866	2.3033	-1.6513	1.3643	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.7071	.4828	.1785	.5048	.6110	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2823	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
3.1921	2.1419	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.8746	.7925	.7955

PU SPEED = .9400

PU SLIP

0.0

PU TORQUE = 2.2716 STATOR FLUX = .8373

CONDITION ACCEPTABLE?, YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
2.9394	-1.4279	2.3033	-2.7122	1.6960	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.6916	.4368	.1785	.3765	.6021	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2823	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
3.9980	3.1988	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.8373	.7101	.7176

PU SPEED = .9000

PU SLIP

0.15

PU TORQUE = 2.5807 STATOR FLUX = .8111

CONDITION ACCEPTABLE?, YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
3.9809	-1.4950	2.3033	-3.7948	1.7425	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.6886	.3897	.1785	.2579	.5616	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
4.8361	4.1758	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.8111	.6180	.6325

PU SPEED = .8500

PU SLIP

0.175

PU TORQUE = 2.6302 STATOR FLUX = .8040

CONDITION ACCEPTABLE?, YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
4.4026	-1.4458	2.3033	-4.2313	1.6821	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.6908	.3706	.1785	.2134	.5368	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
5.1747	4.5534	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.8040	.5776	.5960

PU SPEED = .8250

PU SLIP

0.18

PU TORQUE = 2.6345 STATOR FLUX = .8030

CONDITION ACCEPTABLE?, YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
4.4796	-1.4319	2.3033	-4.3110	1.6660	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.6915	.3671	.1785	.2055	.5317	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
5.2367	4.6218	.9984	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.8030	.5700	.5891

PU SPEED = .8200

PU SLIP

0.185

PU TORQUE = 2.6371 STATOR FLUX = .8020

CONDITION ACCEPTABLE?, YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
4.5544	-1.4170	2.3033	-4.3883	1.6489	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.6921	.3637	.1785	.1979	.5266	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
5.2968	4.6879	.9834	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.8020	.5625	.5824

PU SPEED = .8150

PU SLIP

0.19

PU TORQUE = 2.6384 STATOR FLUX = .3011

CONDITION ACCEPTABLE?, YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
4.6270	-1.4011	2.3033	-4.4633	1.6308	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.6929	.3604	.1785	.1905	.5215	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
5.3551	4.7519	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.8011	.5552	.5759

PU SPEED = .8100

PU SLIP

0.195

PU TORQUE = 2.6382 STATOR FLUX = .8004

CONDITION ACCEPTABLE?, YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
4.6974	-1.3844	2.3033	-4.5360	1.6119	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.6936	.3572	.1785	.1835	.5164	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
5.4118	4.8139	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.8004	.5480	.5695

PU SPEED = .8050

PU SLIP

0.2

PU TORQUE = 2.6368 STATOR FLUX = .7997

CONDITION ACCEPTABLE?, YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
4.7657	-1.3669	2.3033	-4.6065	1.5922	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.6944	.3541	.1785	.1767	.5113	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
5.4668	4.8739	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.7997	.5410	.5633

PU SPEED = .8000

PU SLIP

0.21

PU TORQUE = 2.6306 STATOR FLUX = .7985

CONDITION ACCEPTABLE?, YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
4.8962	-1.3299	2.3033	-4.7412	1.5509	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.6961	.3482	.1785	.1640	.5012	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
5.5720	4.9834	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.7985	.5273	.5513

PU SPEED = .7900

PU SLIP

0.25

PU TORQUE = 2.5721 STATOR FLUX = .7964

CONDITION ACCEPTABLE?, YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
5.3464	-1.1648	2.3033	-5.2048	1.3696	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.7036	.3278	.1785	.1216	.4622	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
5.9368	5.3820	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.7964	.4779	.5084

PU SPEED = .7500

PU SLIP

0.3

PU TORQUE = 2.4557 STATOR FLUX = .7975

CONDITION ACCEPTABLE?, YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
5.7784	-.9455	2.3033	-5.6483	1.1323	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.7135	.3082	.1785	.0838	.4180	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
6.2920	5.7607	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.7975	.4263	.4649

PU SPEED = .7000

PU SLIP

0.4

PU TORQUE = 2.1863 STATOR FLUX = .8045

CONDITION ACCEPTABLE?. YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
6.3549	-.5374	2.3033	-6.2376	.6960	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.7320	.2821	.1785	.0386	.3462	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
6.7807	6.2763	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.8045	.3483	.4027

PU SPEED = .6000

PU SLIP

0.5

0.5

0.77, 0.57, -0.74, 60.

ROTOR EXCITATION YES(=1) OR (NO=0)

0

INPUT INITIAL CONDITION VIA TTY YES OR NO

0

PU SLIP

0.5

PU TORQUE = 1.9362 STATOR FLUX = .8130

CONDITION ACCEPTABLE?, YES OR NO

1

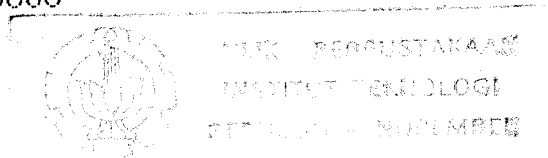
IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
6.7062	-.2020	2.3033	-6.5948	.3400	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.7472	.2662	.1785	.0151	.2928	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
7.0936	6.6036	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.8130	.2932	.3622



PU SPEED = .5000

PU SLIP

0.7

PU TORQUE = 1.5478 STATOR FLUX = .8278

CONDITION ACCEPTABLE?, YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
7.0914	.2812	2.3033	-6.9839	-.1701	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.7691	.2488	.1785	-.0054	.2215	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
7.4613	6.9860	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.8278	.2216	.3157

PU SPEED = .3000

PU SLIP

0.85

PU TORQUE = 1.3369 STATOR FLUX = .0062

CONDITION ACCEPTABLE? YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
7.2485	.5313	2.3033	-7.1414	-1.4332	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.7804	.2416	.1785	-.0113	.1865	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
7.6242	7.1545	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.8362	.1869	.2966

PU SPEED = .1500

PU SLIP

0.95

PU TORQUE = 1.2238 STATOR FLUX = .0008

CONDITION ACCEPTABLE? YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
7.3214	.6628	2.3033	-7.2141	-1.5712	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.7864	.2383	.1785	-.0133	1.1686	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
7.7037	7.2367	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.8408	.1691	.2879

PU SPEED = .0500

PU SLIP

1.0

PU TORQUE = 1.1738 STATOR FLUX = .8429

CONDITION ACCEPTABLE?, YES OR NO

1

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
7.3513	.7204	2.3033	-7.2440	-.6317	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.7890	.2370	.1785	-.0140	.1608	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.5700	-.7563	.2828	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
7.7373	7.2715	.9884	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.8429	.1614	.2844

PU SPEED = .0000

PU MOTOR PARAMETERS AT DESIGN POINT OF
 FE = 60.0000 KW = 7.4570 KVA = 7.4570

RS	RR	XLS	XLR	XM
.0453	.0222	.0775	.0322	2.0420

INERTIA CONSTANT H = .5000 SECS

INPUT VAS,VBS,VCS IN PU,FE IN HERTZ

0.77,0.77,0.0,60.

ROTOR EXITATION YES(=1) OR (NO=0)

0

INPUT INITIAL CONDITION VIA TTY YES OR NO

0

PU SLIP

0.02

PU TORQUE = .2027 STATOR FLUX = .6742

CONDITION ACCEPTABLE?,YES OR NO

IQS	IDS	INS	IQR	IDR	INR
.4358	-.2291	5.9117	-.2397	.3538	.0000

PSIQS	PSIDS	PSINS	PSIQR	PSIDR	PSINR
.4342	.2369	.4582	.3927	.2661	.0000

VQS	VDS	VNS	VQR	VDR	VNR
.2567	-.4446	.7260	.0000	.0000	.0000

IS	IR	VS	VR
5.9322	.4273	.8891	.0000

PSIS	PSIR	PSIM
.6742	.4743	.4745

PU SPEED = .9800

TRANSIENT SOLUTION YES OR NO